

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APALPADOR OPTOELETRÔNICO PARA
MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ODILSON TADEU VALLE

FLORIANÓPOLIS, ABRIL 1993

II

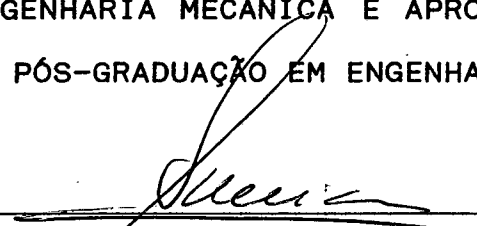
APALPADOR OPTOELETRÔNICO PARA
MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

ODILSON TADEU VALLE

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE


MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - Orientador


Prof. BEREND SNOEIJER, Dr. Ing. - Coordenador

BANCA EXAMINADORA


Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - Presidente


Prof. CARLOS ALBERTO MARTIN, Dr. Ing.


Prof. HERMANN ADOLF HARRY LÜCKE, Dr. Ing.


Eng. JÚLIO CÉSAR DE LUCA, M. Eng.

À Alessandra, minha namorada,
a toda minha família,
e a todos meus amigos,
que deram todo o seu apoio durante
a realização deste trabalho

AGRADECIMENTOS

- À Fundação CERTI e LABMETRO pela disposição de sua Infra-estrutura;
- Ao CNPq/RHAE (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento) pelo apoio financeiro;
- Ao professor Carlos Alberto Schneider pela orientação deste trabalho;
- À Arthur Wolf Müller pelas enormes sugestões, auxílio e apoio;
- À José Paulo Alves pelo auxílio nas montagens e testes;
- À Marcelo Gevaerd pelo auxílio nos *softwares*;
- Ao Manoel Joaquim dos Santos, por me fazer herdeiro de toda estrutura por ele montada;
- Ao INF (setor de Informações do CERTI), especialmente a Elizete Vieira Vitorino Estefano, pelo apoio na pesquisa bibliográfica;
- À todos os colegas da Fundação CERTI que contribuíram, direta ou indiretamente, na execução deste trabalho e pelo companheirismo demonstrado ao longo destes anos.

SUMÁRIO

RESUMO	x
------------------	---

ABSTRACT	xi
--------------------	----

GLOSSÁRIO	xii
---------------------	-----

1 - <u>INTRODUÇÃO</u>	1
---------------------------------	---

1.1 - OPTOELETRÔNICA NA METROLOGIA GEOMÉTRICA	2
---	---

1.1.1 - Métodos de Medição Optoeletrônicos	3
--	---

a) Medição por sombra geométrica	3
--	---

b) Medição por triangulação	3
---------------------------------------	---

c) Medição por interferometria	4
--	---

d) Autofoco	5
-----------------------	---

1.2 - APALPADORES	7
-----------------------------	---

1.3 - PROPOSTA DE TRABALHO/MOTIVAÇÃO	9
--	---

2 - <u>APALPADORES E COMPONENTES OPTOELETRÔNICOS CONSTITUINTES</u>	11
--	----

2.1 - FUNÇÃO DOS APALPADORES	11
--	----

2.2 - APALPADORES PARA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS	12
---	----

2.2.1 - Apalpador Rígido	13
------------------------------------	----

	vi
2.2.2 - Apalpador Comutador	14
2.2.3 - Apalpador Medidor	16
2.2.4 - Apalpador óptico	17
2.3 - APALPADORES OPTOELETRÔNICOS	18
2.3.1 - Apalpador Medidor por Triangulação	18
2.3.2 - Apalpador Medidor por Autofoco	19
2.3.3 - Apalpador por Interrupção de Feixe	21
2.4 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS APALPADORES	21
2.5 - DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS COMPONENTES OPTOELETRÔNICOS	
PARA O APALPADOR DE INTERRUPTÃO DE FEIXE	23
2.5.1 - Diodo Laser	23
2.5.2 - Características do Diodo Laser	25
a) Elétrica	27
b) Espacial	27
c) Espectral	27
d) Variação do comprimento de onda (<i>Lasing</i> <i>wavelength</i>)	28
e) Óptica	28
f) Dinâmica	28
2.5.3 - Fotodetector	30
2.5.4 - Modos de operação e características do fotodetector de intensidade	31
a) Resistência <i>Shunt</i> , R_{sh}	33
b) Resistência Série, R_s	33
c) Capacitância de junção, C_j	33
d) Características I-V	34
e) Responsividade	34
f) Circuito Equivalente	35
g) Ruído	36

h) NEP (<i>Noise Equivalent Power</i>)	36
3 - <u>DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE APALPADOR OPTOELETRÔNICO</u>	37
3.1 - CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS	37
3.2 - DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO	39
3.2.1 - Módulos	40
3.2.2 - Funcionamento	42
3.2.3 - Fontes de Erro	44
3.3 - COMPONENTES OPTOELETRÔNICOS	48
3.3.1 - Diodo Laser	49
3.3.2 - Fotodetector	50
3.4 - COMPONENTES ÓPTICOS	51
3.4.1 - Lentes	52
3.4.2 - Diafragmas	53
3.5 - COMPONENTES ELETRÔNICOS	54
3.6 - ARCO	55
3.6.1 - Tolerâncias	55
a) Tolerância de Localização de	
Concetricidade	56
b) Tolerância de Localização de Posição	56
3.6.2 - Ajustes dos Componentes	57
3.6.3 - Projeto do Arco	58
3.7 - ACOPLAMENTO DO APALPADOR OPTOELETRÔNICO A MÁQUINA DE	
MEDIR POR COORDENADAS	59
3.8 - ANÁLISE DE ERROS NA CADEIA DE MEDIÇÃO	61
3.8.1 - Erros Sistemáticos	61
3.8.2 - Erros Aleatórios	62

4 - RECURSOS PARA ENSAIO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DO PROTÓTIPO FUNCIONAL	65
4.1 - INSTRUMENTOS PARA A BANCADA DE ENSAIOS	67
4.1.1 - Padrões corporificados	68
a) Jogo de arames padrão	68
b) Pino	69
4.1.2 - Dispositivos para fixação e alinhamento dos padrões corporificados	69
4.1.3 - Mesa de Microdeslocamentos	70
4.1.4 - Escala e Dispositivo para Fixação e Movimentação Angular	72
4.1.5 - Dispositivo para Fixação e Deslocamentos Transversais do Apalpador	74
4.2 - AUTOMAÇÃO DA BANCADA PARA ENSAIOS	75
4.2.1 - <i>Hardware</i>	75
4.2.2 - <i>Software</i>	77
5 - ENSAIOS E RESULTADOS	79
5.1 - ENSAIO DO TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO	80
5.2 - ENSAIO DE REPETIBILIDADE E HISTERESE	82
5.3 - ENSAIO DE VARIAÇÃO DOS DIÂMETROS MEDIDOS COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE	83
5.4 - ENSAIO DE SENSORIAMENTO EM DIFERENTES POSIÇÕES AO LONGO DO FEIXE	87
5.5 - MEDIÇÃO DE DIFERENTES DIÂMETROS	90
5.6 - CONSIDERAÇÕES METROLÓGICAS FINAIS	91
5.6.1 - Cálculo da Dispersão da Medição do Apalpador	92

	ix
5.6.2 - Cálculo do Erro Sistemático do Apalpador	93
5.7 - OUTRAS CARACTERÍSTICAS	95
6 - <u>CONCLUSÕES</u>	96
7 - <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	99

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre apalpadores para Máquina de Medir por Coordenadas (CMM) e o desenvolvimento de um apalpador optoeletrônico, com aplicação em medições de perfis, sem contato e com alta velocidade.

Através de uma análise de mercado e literatura optou-se pelo estudo e desenvolvimento de um apalpador baseado no princípio de apalpação por interrupção de feixe. Este princípio, ainda pouco explorado por trabalhos científicos, revela-se bastante promissor. O princípio baseia-se na identificação e medição de fronteiras de peças através da utilização de um feixe de diodo laser com diâmetro de $30\mu\text{m}$, fotodetector e eletrônica de processamento de sinal.

Um protótipo funcional de apalpador, utilizando este princípio, foi projetado, construído e qualificado através de uma bancada especial de ensaios.

Os resultados dos ensaios realizados mostram que o protótipo é capaz de determinar a coordenada da borda de uma peça, com uma repetibilidade na ordem de $\pm 0.4\mu\text{m}$. Quanto ao erro sistemático, o protótipo mostrou-se sensível ao raio de curvatura da superfície da peça, com um erro na ordem de $15\mu\text{m}$ para diâmetros de 0.5 a 10mm, compensáveis por *software*. Acima de 10mm a variação do erro sistemático tende a valores desprezíveis.

ABSTRACT

This work presents a study of probes used in Coordinate Measuring Machines (CMM). An optoelectronic probe has been developed for being applied in the measurement of parts and profiles. There is no mechanical contact with the part and it is measured at a high rate.

The principle used in this probe is based on the interruption of a laser diode beam. A photodiode and a specialized circuitry acquire, process the signal and identifies the position of the part's board. The laser diode beam diameter is approximately 30 μ m.

A prototype has been designed, built and qualified by using a special test bench.

The results of the tests show that the developed probe is able to measure the position of the part's boards within $\pm 0.4\mu$ m of repeatability. Systematic errors are influenced by the curvature of the part's surface, but they can be compensated by software after a special calibration.

GLOSSÁRIO**DAS SIGLAS E ACROGRAFIAS ADOTADAS NO TEXTO**

SIGLA	INGLÊS	PORTUGUÊS
CCD	Charge Coupled Device	dispositivo de carga associada
CMM	Coordinate Measuring Machine	máquina de medir por coordenadas
CNC	Computer Numeric Control	Comando Numérico por Computador
LED	Light Emitting Diodes	diodo emissor de luz
PC	Personal Computer	computador pessoal
TTL	Transistor - Transistor Logical	lógica de transistor a transistor

1 - INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento industrial, com as linhas de produção das fábricas cada dia mais dinâmicas e flexíveis e o aumento das exigências de qualidade e produtividade, geram a necessidade de uma medição e inspeção cada vez mais criteriosa e confiável.

Para atender aos rígidos requisitos impostos à medição e inspeção, estas têm sofrido um avanço vertiginoso, baseado no desenvolvimento da eletrônica, optoeletrônica, mecânica fina, computação e robótica.

Dentre os sistemas de medição e inspeção, um que tem se destacado bastante, por sua versatilidade, universalidade e precisão é a Máquina de Medir por Coordenadas (CMM). Um dos componentes vitais da CMM é o apalpador, que atua como sensor da posição de pontos da peça sob medição.

A optoeletrônica também tem alavancado o desenvolvimento na área de medição e inspeção. Devido ao barateamento de seus componentes, hoje encontram-se disponíveis no mercado vários sistemas de medição que utilizam princípios ópticos e tem como característica marcante a ausência de contato mecânico com a peça e a elevada velocidade de medição.

O presente trabalho tem o intuito de conjugar a Máquina de Medir por Coordenadas com a optoeletrônica; mais especificamente com o apalpador optoeletrônico.

1.1 - OPTOELETRÔNICA NA METROLOGIA GEOMÉTRICA

Com o advento do laser, no início da década de 60, teve início uma revolução no campo da metrologia que promoveu a criação de novos princípios de medição baseados na optoeletrônica. Com o desenvolvimento das tecnologias associadas, hoje os sistemas optoeletrônicos são relativamente de menor custo e com a grande vantagem de propiciarem medição sem contato. Outras vantagens dos sistemas optoeletrônicos, em relação aos sistemas mecânicos, são /1,2/:

- facilidade de uso (sem preparação da superfície);
- Incerteza de medição relativamente baixa;
- flexibilidade para adequação da faixa de operação;
- alta velocidade de medição/inspeção;
- facilidade de automação;
- velocidade de medição bastante alta;
- medição em lugares de difícil acesso;
- longa vida, baixo custo e baixa depreciação.

Os maiores problemas encontrados na sua utilização são a poeira, no chão de fábrica - que pode provocar absorção de luz ou alterações no caminho óptico - e a iluminação ambiente - que pode interferir na referência luminosa do sistema. Esses problemas podem

ser solucionados, em parte, por algumas medidas do tipo: cortina de ar, modulação, etc.

1.1.1 - Métodos de Medição Optoeletrônicos

Vários métodos de medição por princípios optoeletrônicos foram desenvolvidos nos últimos anos, a sua grande maioria só foi posta em prática com o desenvolvimento do laser. Para a medição geométrica, os que mais se destacaram foram:

a) Medição por sombra geométrica /3,4,5/

Na medição por sombra geométrica há a obstrução parcial da cortina de feixe laser pelo objeto a ser medido, a dimensão da peça é equivalente a sua sombra. Na figura 1.1.a observa-se este princípio onde a dimensão da peça é equivalente a região escura sobre o fotodetector. Na figura 1.1.b tem-se o mesmo princípio onde a dimensão da peça é equivalente ao tempo que a região escura permaneceu sobre o fotodetector, já que há uma varredura pelo feixe laser sobre a peça;

b) Medição por triangulação /3,4,6-9/

Na medição por triangulação a determinação da distância dá-se pela diferença nas posições de focalização do feixe de luz, sobre o fotodetector de posição (fig. 1.2.a) provocadas pela introdução de uma outra peça ou pela movimentação da mesma. Na figura 1.2.b observa-se uma variação deste princípio, onde a detecção é feita por uma câmera CCD, utilizado na determinação de bordas de peças;

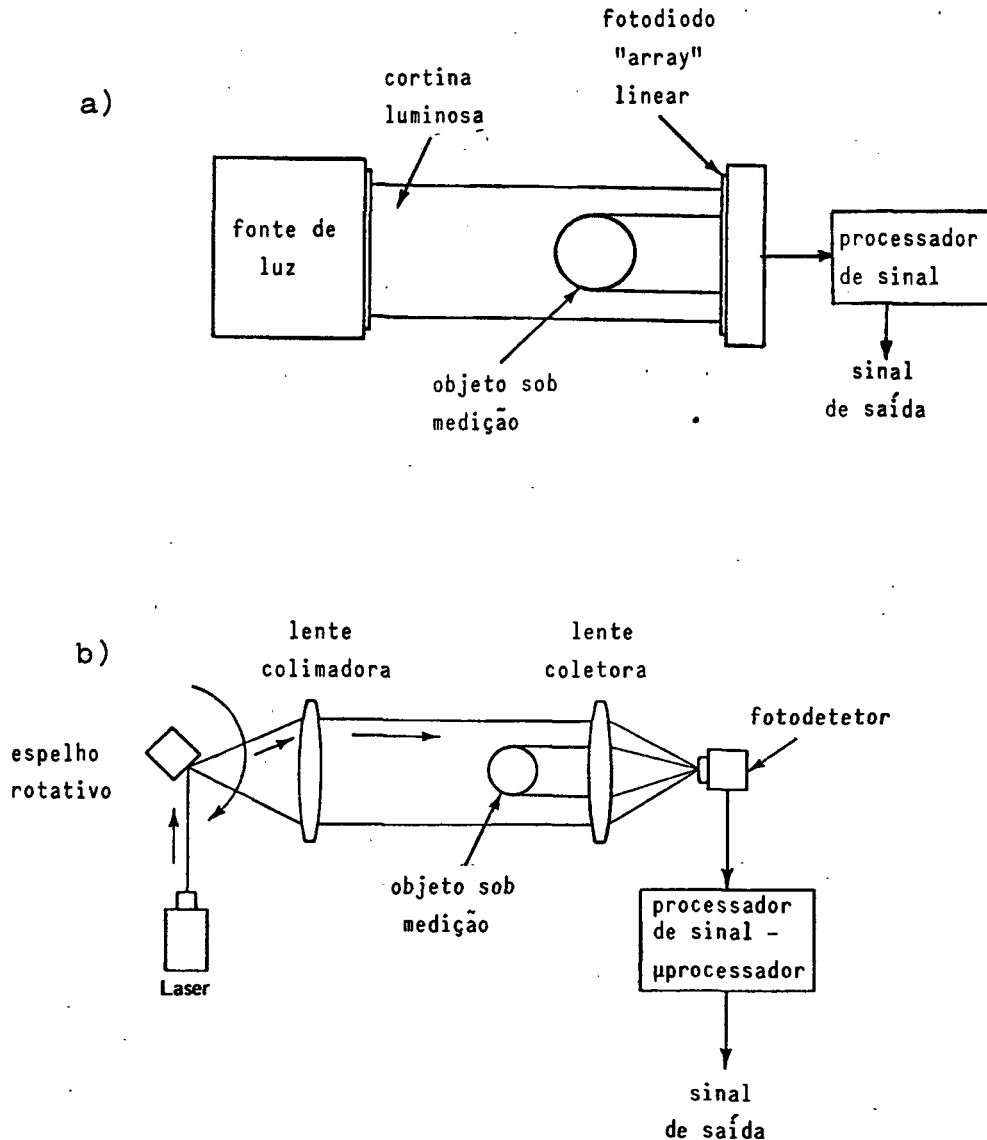


Figura 1.1 - Princípio de medição por sombra geométrica /4/

a) conversão sombra-intensidade

- b) conversão sombra-tempo

c) Medição por Interferometria /1,3,10-16/

A medição por interferometria tem por base dois feixes de luz coerente (fig 1.3) emitidos pela da mesma fonte, que depois de percorrem caminhos ópticos diferentes e serem recombinados, proporcionam diferentes amplitudes devido as diferenças de fase e por conseguinte a diferença de comprimento dos caminhos ópticos;

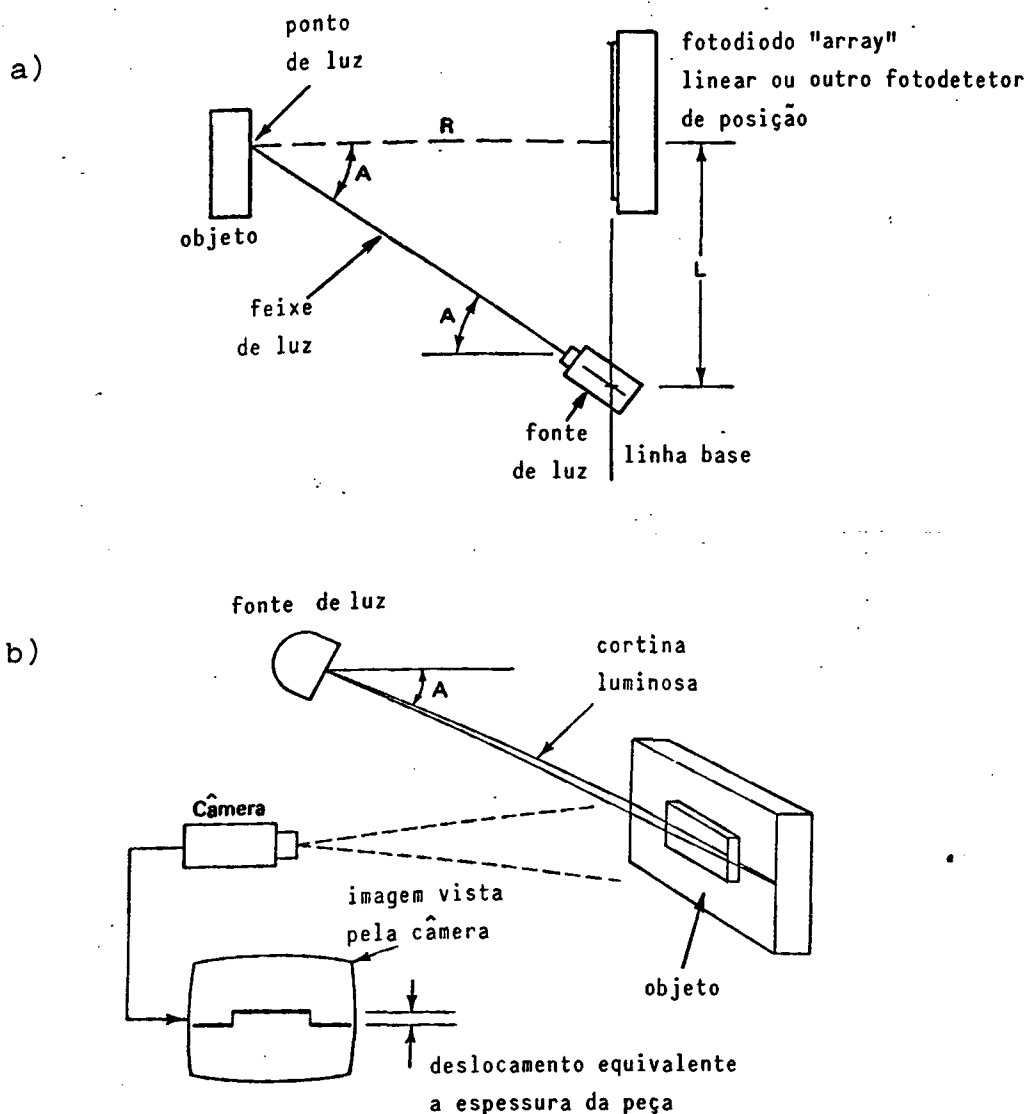


Figura 1.2 - Princípio de medição por triangulação

a) princípio da triangulação

b) variação deste princípio para medição de contornos

d) Autofoco /3,17,18,19/

Nos sistemas por autofoco, a imagem da fonte luminosa é projetada sobre a superfície da peça sob medição (fig. 1.4). Parte da luz refletida pela superfície é retomada pela própria objetiva e é então concentrada sobre um fotodetector de intensidade. Quando a focalização vai sendo atingida pelo deslocamento da objetiva, o sinal do fotodetector vai chegando

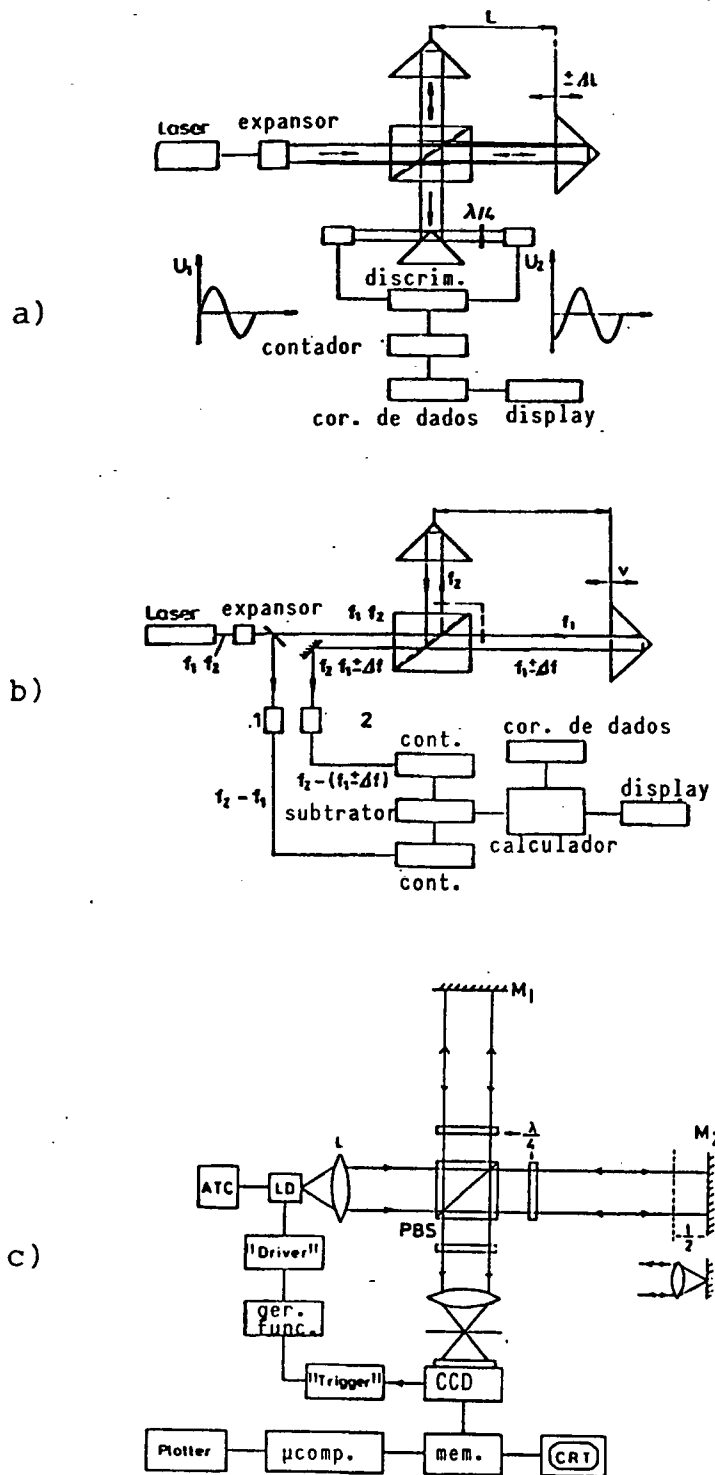


Figura 1.3 - Medição por interferometria

- a) Interferômetro de Michelson, frequência simples /12/
- b) Interferômetro de Michelson, frequência dupla /12/
- c) Interferômetro heterodyne /13/

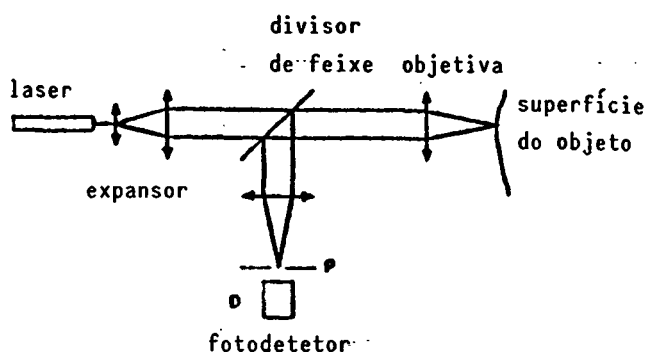


Figura 1.4 - Princípio de medição por autofoco /3/

ao máximo. No ponto de máximo, sabe-se que a objetiva está focalizada. O sistema posicionador da objetiva movimenta a mesma de forma a buscar a focalização. Ao posicionador instala-se um sistema de medição de deslocamentos.

1.2 - APALPADORES

A máquina de medir por coordenadas (CMM) executa a tarefa de medição fazendo uma correlação de alguns pontos definidos da peça com um sistema de coordenadas especial, normalmente o sistema coordenado cartesiano. A CMM tem como características/componentes básicos (fig. 1.5):

- mesa, para apoio das peças sob medição;
- guias, normalmente de granito, com suas respectivas escalas eletroópticas;
- apalpador, que entra em contato com a peça para a correlação com o sistema de coordenadas cartesiano;

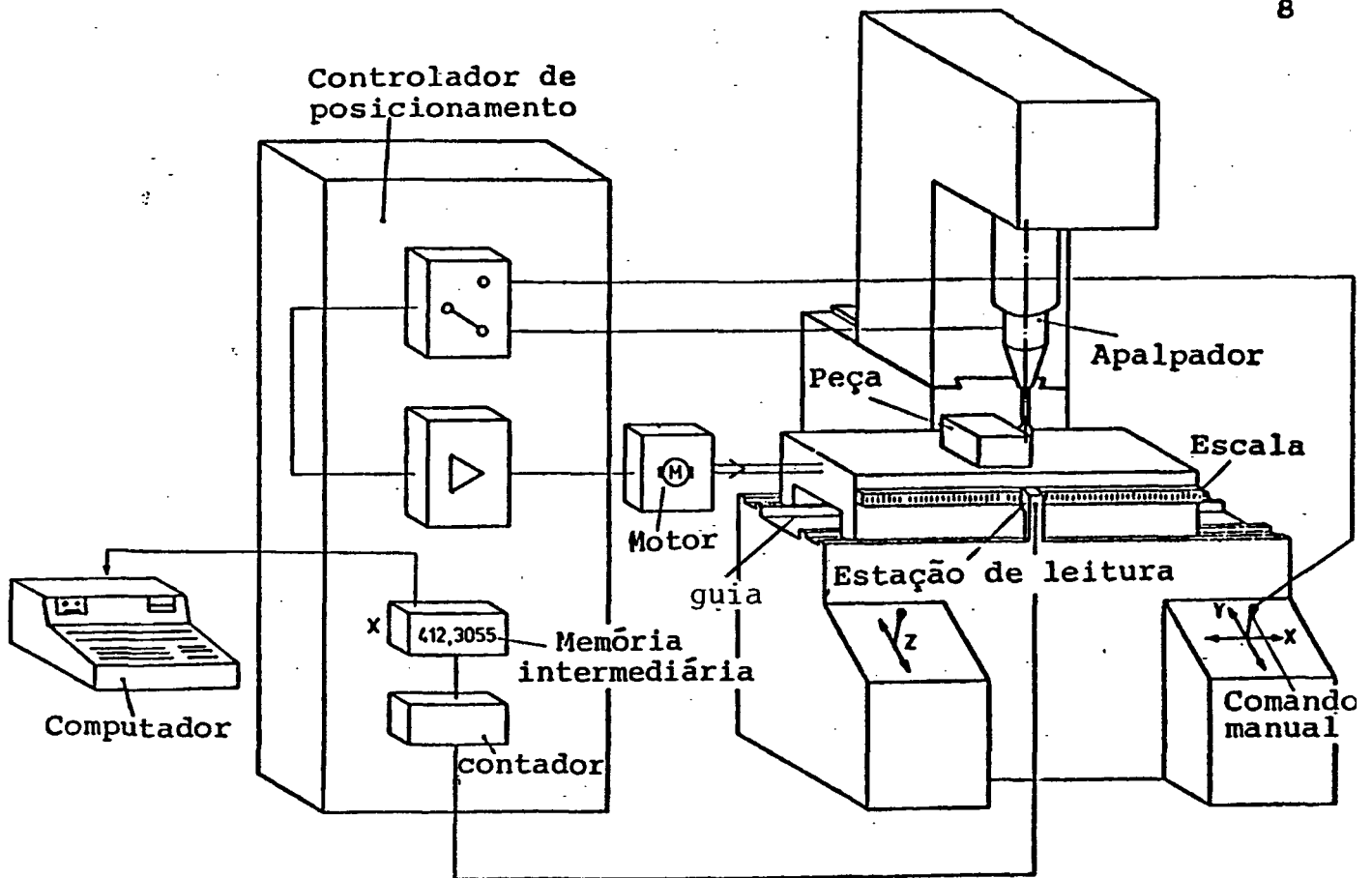


Figura 1.5 - Máquina de medir por coordenadas tridimensional /20/

- unidade de tratamento de sinal e indicação - estação de leitura, contador, memória intermediária e computador (nas CMM's mais sofisticadas) para aquisição e processamento das coordenadas relativas a peça;
- motor e controlador de posicionamento (nas CMM's mais sofisticadas), para executar os devidos movimentos para varredura da peça.

A função do apalpador é o sensoriamento do ponto de medição da peça para que a CMM correlacione diversos pontos da peça com o seu sistema de coordenadas. As coordenadas relativas a peça devem ser suficientes/condizentes com as grandezas de interesse na mesma.

A evolução das CMM provocou uma conseqüente evolução dos apalpadores, dentre os de maior utilização nos dias de hoje tem-se:

- localizadores rígidos, utilizados em máquinas operadas manualmente /20/;
- apalpador comutador, dispositivo que gera um *trigger* quando da apalpação da peça, para que a máquina proceda a leitura das coordenadas;
- apalpador medidor, dispositivo eletro-mecânico que além de gerar um *trigger* para a máquina, gera um sinal proporcional a deflexão do sensor, ocorrida ao tocar a peça /20/;
- localizador óptico, voltado para medições com observação visual da imagem da peça /20/;
- apalpadores optoeletrônicos, que operam basicamente como o apalpador comutador ou medidor, a diferença está no fato de que não existe contato direto entre o sensor e a peça /1,3,6,7,8,20/.

1.3 - PROPOSTA DE TRABALHO/MOTIVAÇÃO

A grande maioria dos apalpadores optoeletrônicos se encontra hoje a nível experimental/laboratorial, com algumas aplicações de uso comercial. A literatura sobre o assunto é bastante limitada, especialmente no que diz respeito aos apalpadores baseados no princípio de interrupção de feixe.

A proposta para o presente trabalho é o estudo de apalpadores optoeletrônicos, das características e componentes a eles relacionados. O desenvolvimento de um protótipo laboratorial de apalpador optoeletrônico e a qualificação deste protótipo no que

diz respeito as características metrológicas, operacionais e físicas.

A motivação para tal desenvolvimento provém da necessidade industrial de sistemas mais rápidos e confiáveis de medição, o que está de acordo com a proposta do apalpador. E também uma contribuição no estudo e desenvolvimento de sistemas optoeletrônicos aplicados, em especial à apalpadores.

2 - APALPADORES E COMPONENTES OPTOELETRÔNICOS CONSTITUINTES

Os apalpadores são peça chave na versatilidade da máquina de medir por coordenadas (CMM). Neste capítulo será feita uma breve análise de alguns tipos/princípios daqueles disponíveis no mercado. Com especial atenção para os optoeletrônicos, que apresentam facilidades de uso, por exemplo, em *scanning* de peças com geometria complexa.

Também será feita uma análise de componentes optoeletrônicos passíveis de utilização no desenvolvimento de um protótipo de apalpador optoeletrônico.

2.1 - FUNÇÃO DOS APALPADORES

O apalpador é o componente que, acoplado ao braço de medição da CMM, entra em contato com o ponto de medição da peça (fig. 2.1) permitindo relacionar o ponto de contato com o sistema de coordenadas da máquina. Este deve ser compatível com a CMM, no que diz respeito:

- ao acoplamento mecânico;
- a comunicação e transferência de sinais - *trigger* ou proporcional a deflexão do mesmo;

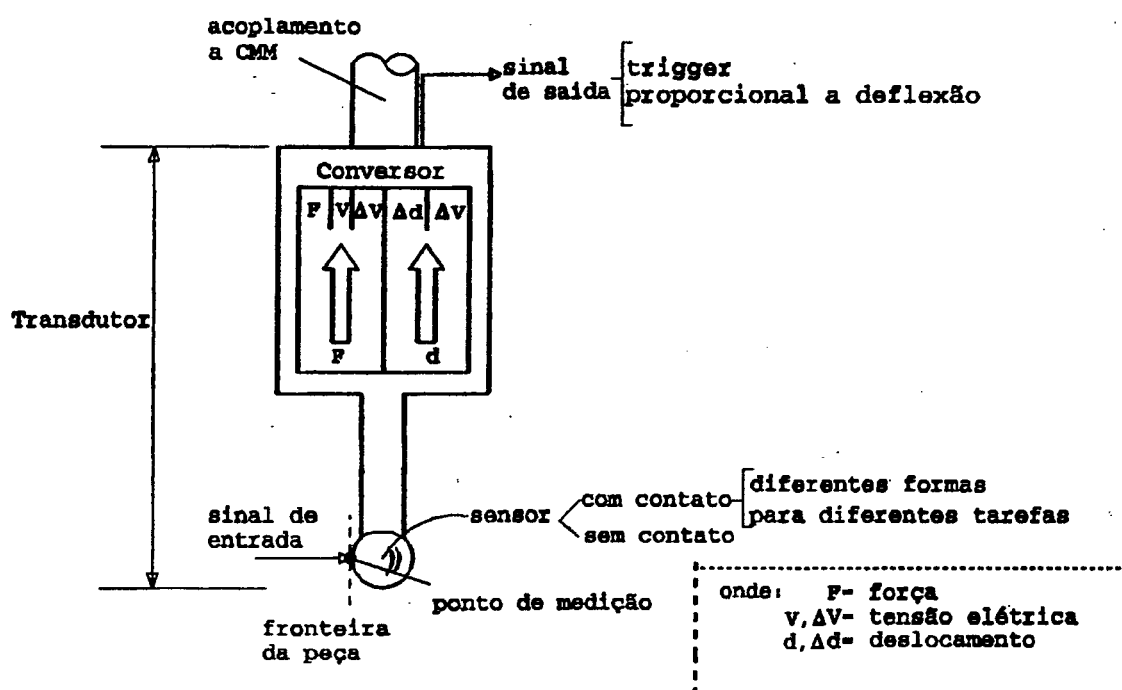


Figura 2.1 - Módulos de um apalpador genérico

- características metrológicas;
- características funcionais, etc.

2.2 - APALPADORES PARA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Na figura 2.2 tem-se as principais características de alguns tipos de apalpadores. O módulo transdutor está sendo caracterizado pelo princípio de sensoriamento, conversor e conversão. O sinal de saída refere-se ao sinal de comunicação com a CMM. O número de direções de apalpação diz respeito ao número de eixos coordenados que o apalpador pode atender (1D, 2D e 3D).

A seguir serão apresentados, de maneira sucinta, os tipos mais usuais de apalpadores encontrados no mercado.

Transdutor			Sinal de Saída	Número de direção de apalpação
Princípio de sensoria-mento	Conversor(es)	Conversão		
mecânico rígido	haste rígida	F→F	bloqueio do(s) eixo(s)	3
eletro mecânico ligador	comutador elétrico	F→V	<i>trigger</i>	3
eletro mecânico medidor	indutivo	F→ΔV	<i>trigger</i> + sinal proporcional	1,2,3
óptico	óptico	d→Δd	reticulado para leitura visual	1
optoeletrônico	optoeletrônico por triangulação	d→ΔV	<i>trigger</i> + sinal proporcional	1
	optoeletrônico por autofoco	d→ΔV	<i>trigger</i> + sinal proporcional	1
	optoeletrônico por interrupção de feixe	d→V	<i>trigger</i>	1,2

onde: F = Força; V, ΔV = Tensão; d, Δd = deslocamento

Figura 2.2 - Características de alguns princípios de apalpadores

2.2.1 - Apalpador Rígido

O apalpador rígido é composto unicamente pelo sensor, a própria haste rígida. É somente utilizado em CMM com operação manual, pois proporciona tão somente um bloqueio nos eixos quando do toque com a peça. Como características pode-se citar: diferentes formas para

diferentes geometrias (fig. 2.3) e força de medição dependente do operador.

2.2.2 - Apalpador Comutador

O apalpador comutador chaveia um sinal elétrico - alto/baixo, aberto/fechado - após uma determinada deflexão do sensor, disparando a rotina de leitura das coordenadas da máquina. O chaveamento ocorre normalmente via microchaves (fig. 2.4), ou via dispositivos piezo-elétricos /20,21/.

No apalpador comutador as coordenadas são determinadas com o chaveamento das microchaves do apalpador, sem que este contribua com uma parcela do valor a ser lido. A determinação das coordenadas pode estar afetada por erros do tipo /20,21/: na medição dinâmica existe um atraso entre o chaveamento e a efetivação da leitura; erro de chaveamento, ou seja, pela disposição radial das chaves (fig.2.4) cria-se diferentes deflexões para diferentes posições de contato entre o apalpador e a superfície da peça sob medição, gerando um erro na posição de chaveamento.

As principais vantagens deste apalpador são a maior velocidade que alcança nos processos de medição, apesar do atraso no chaveamento - quando comparado, por exemplo, ao apalpador medidor - baixo custo, simplicidade e a possibilidade de utilização em máquinas com e sem CNC (*Computer Numerical Control*).

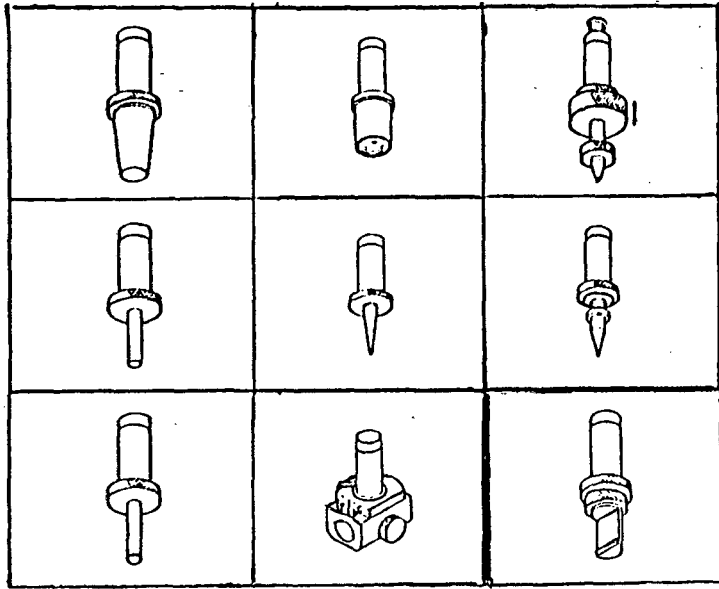


Figura 2.3 - Algumas possíveis formas de apalpadores rígidos /20/

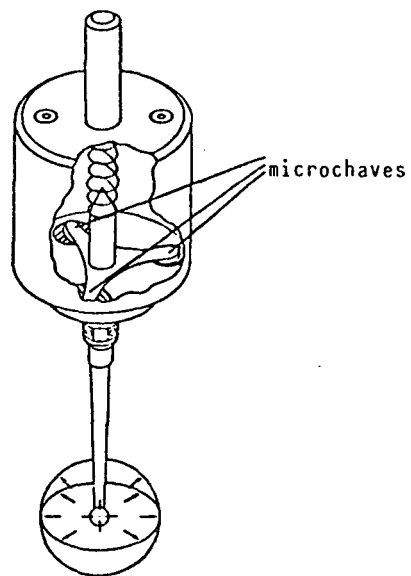


Figura 2.4 - Apalpador comutador /21/

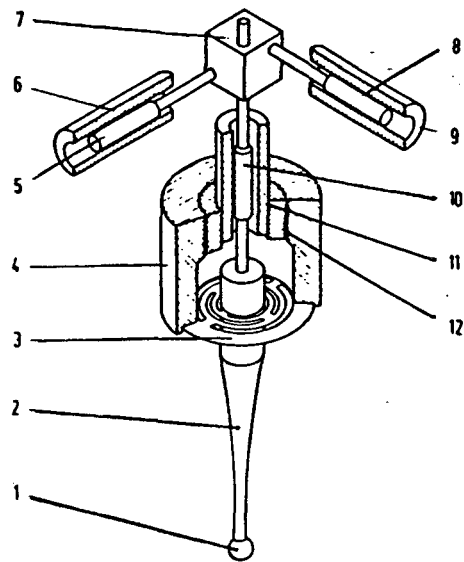
2.2.3 - Apalpador Medidor

O apalpador medidor, ao tocar a peça, além de disparar a rotina de leitura das coordenadas da máquina, gera um sinal proporcional a deflexão do seu sensor. A combinação destes dois sinais fornece a efetiva coordenada em questão. O sinal também pode ser usado para comandar a máquina e zerar a deflexão do apalpador e após isto proceder a leitura das coordenadas, neste caso a leitura é mais lenta.

Cada eixo de medição possui um módulo composto de mola e transdutor de deslocamento indutivo (fig. 2.5), que fornece à máquina um sinal proporcional a sua deflexão /20,22,23/. Na sua construção podem ser empregadas duas configurações mecânicas de molas: lâminas paralelas, mais usual, e membrana.

A medição pode ser: estática - onde zera-se a deflexão do sensor do apalpador e procede-se a leitura das coordenadas dos eixos da máquina - esta medição necessita de mais tempo já que é necessário a imobilização dos eixos da máquina no ponto zero do apalpador; dinâmica - onde a coordenada é dada pela combinação da leitura do apalpador e da máquina - esta proporciona uma leitura mais rápida, bastante utilizada nas medições tipo *scanning*.

O apalpador medidor é um dos apalpadores que possui a menor incerteza de medição dentre os comercialmente avaliados, e portanto, é um dos mais empregados em medições laboratoriais ou onde seja necessário baixa incerteza do resultado.



- 1 - sensor
- 2 - haste
- 3 - membrana
- 4 - cápsula
- 5.8.10 - núcleos de ferrite
- 6.9.11 - bobinas
- 7 - peça de junção
- 12 - dispositivo para deslocamento da bobina

Figura 2.5 - Apalpador medidor /22/

2.2.4 - Apalpador óptico

O apalpador óptico ou puramente óptico está baseado nos princípios da óptica geométrica, com as mesmas funções de um microscópio de medição ou de um projetor de perfil (fig. 2.6), ou seja, é um dispositivo para medição visual da peça. Através da focalização da imagem sobre reticulados de leitura visual, determina-se as dimensões da peça.

A medição com este apalpador é bastante demorada e tem sua incerteza de medição afetada pelo operador.



MICROSCÓPIO CENTRADOR

- aumento: 30X
- campo de visão: 5.3mm
- distância de trabalho: 50mm

PROJETOR CENTRADOR

- aumento: 15X
- campo de visão: 6mm
- distância de trabalho: 16mm

Figura 2.6 - Apalpadores ópticos /20/

2.3 - APALPADORES OPTOELETRÔNICOS

Os apalpadores optoeletrônicos estão sendo empregados, não em detrimento dos convencionais, mas sim, em situações onde seja necessário alguma característica especial do tipo: medição sem contato de peças delicadas, medições de peças com geometrias complexas e medições do tipo *scanning* com alta velocidade. Para tal, já existem alguns princípios sendo bastante empregados e de boa aceitação comercial.

2.3.1 - Apalpador Medidor por Triangulação

O princípio da triangulação prevê a emissão de um feixe de luz, normalmente laser, sobre a superfície sob medição, parte do sinal

refletido é captado por um fotodetector de posição (fig. 2.7). Quando do deslocamento dessa superfície ocorre um deslocamento do ponto focado sobre o fotodetector, sendo este deslocamento proporcional ao deslocamento da superfície /20,24,25/.

Este princípio presta-se bastante bem para a execução de *scanning* em peças com geometrias complexas. Com uma incerteza de medição maior ou igual a $\pm 7\mu\text{m}$, que é função da faixa de operação /8,26,27/.

2.3.2 - Apalpador Medidor por Autofoco

Em um apalpador medidor por autofocus, um feixe laser é focalizado sobre a superfície da peça (fig. 2.8). A luz difusa sobre a peça é retomada por uma objetiva (a mesma que focaliza o feixe sobre a peça) e percorre um caminho óptico até chegar ao fotodetector. Através de uma lente móvel é possível a focalização do feixe laser sobre a superfície da peça. Quando a focalização é atingida o sinal do fotodetector é máximo, e então é disparada a rotina de leitura das coordenadas da máquina. Acoplado a lente móvel existe um transdutor de deslocamento, que gera um sinal proporcional ao seu deslocamento. Com a composição do sinal do transdutor e as coordenadas da máquina é possível obter as coordenadas relativas a peça /3,20,24,28,29,30/.

Os apalpadores, que utilizam este princípio, apresentam uma incerteza de medição da ordem de $\pm 1\mu\text{m}$ /3/ e com uma resolução que, em casos especiais, pode chegar até 2nm /30/.

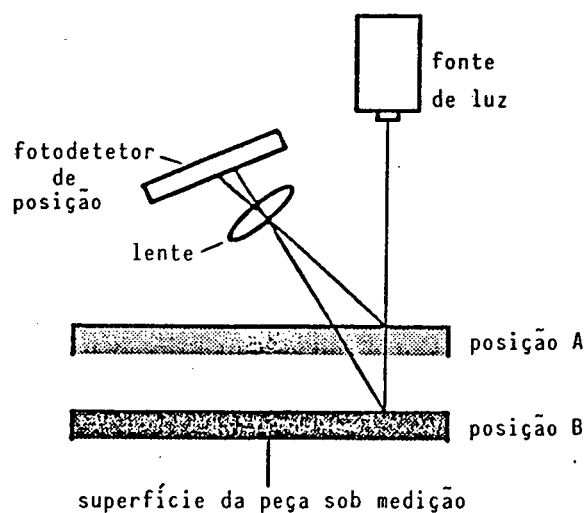


Figura 2.7 - Esquema do apalpador por triangulação /24/

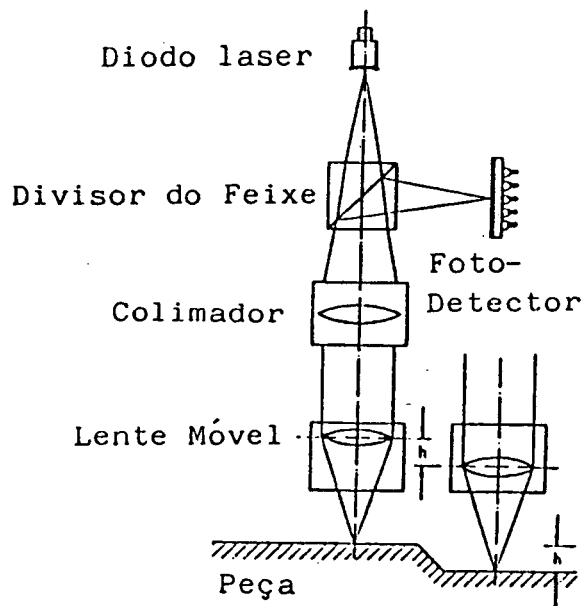


Figura 2.8 - Esquema do apalpador por autofoco /28/

2.3.3 - Apalpador por Interrupção de Feixe

É um sistema que permite o reconhecimento de fronteiras claro/escuro em objetos, com precisão. Tem seu princípio de funcionamento baseado em um "condutor" de luz (fibra óptica) acoplado a um fotodetector (fig. 2.9). Com a movimentação em torno da projeção da peça sob medição, determina-se o local efetivo da fronteira. Se esse sinal de saída for sincronizado com o eixo de movimentação tem-se a coordenada da mesma. Faz-se uma varredura ao longo da projeção da peça, e determina-se várias dessas transições. É então possível determinar a geometria de peças regulares como círculos, retas, diâmetros, ou de chapas /24/.

2.4 - ANÁLISE COMPARATIVA DOS APALPADORES

Na figura 2.10 tem-se um comparativo entre os apalpadores acima descritos.

Outras vantagens da utilização dos apalpadores optoeletrônicos são /24/:

- alta flexibilidade, em vista de diferentes tarefas;
- velocidade de medição bastante alta;
- conceito de sistema robusto para integração no chão de fábrica;
- interface adaptável para comunicação homem/máquina ou máquina/máquina;
- ausência de interação com a peça.

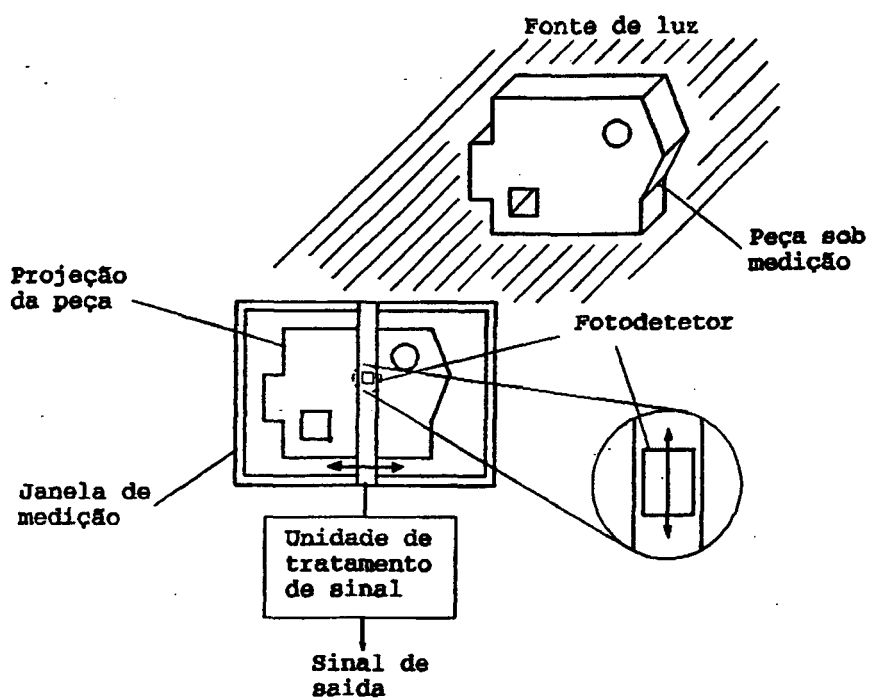


Figura 2.9 - Apalpador optoeletrônico por Interrupção de feixe

Apalpa- dor	Rígi- do	Comu- tador	Medi- dor	Ópti- co	Optoeletrônicos		
					Trian- gula- ção	Auto- foco	Inter- rupção de feixe
Atrito	sim	sim	sim	não	não	não	não
Automa- tizável	não	sim	sim	não	sim	sim	sim
Condi- ção de leitura	está- tica	dinâ- mica	dinâ- mica	está- tica	dinâ- mica	está- tica	dinâmica
Veloci- dade de medição	-	alta	baixa	-	alta	média	alta
Custo	baixo	médio	alto	médio	médio	médio	baixo
Im do princí- pio	alta	média	baixa	baixa	alta	baixa	-

Figura. 2.10 - Análise comparativa dos apalpadores para CMM

Com relação ao apalpador por interrupção de feixe, verifica-se que é um princípio pouco explorado - segundo estudo bibliográfico - mas que possui boas características, quando comparado aos outros (fig. 2.10).

Este princípio guarda certa relação com o método de medição por sombra geométrica. Ou seja: naquele tem-se um espelho rotativo fazendo uma varredura do feixe laser sobre a peça; neste a varredura é feita pelo braço de medição da CMM portanto, sua incerteza de medição pode ser considerada da ordem daquele, $\pm 1\mu\text{m}/3,24/$.

2.5 - DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS COMPONENTES OPTOELETRÔNICOS PARA O APALPADOR DE INTERRUPTÃO DE FEIXE

A seguir será apresentada uma análise técnica do diodo laser e fotodetector, bem como a determinação de suas principais características. Isto com o intuito de avaliar a adequabilidade para a construção de um apalpador optoeletrônico.

2.5.1 - Diodo Laser

O dispositivo semicondutor possui uma camada de material tipo n - com portadores negativos ou elétrons, e outra tipo p - com portadores positivos ou lacunas (fig. 2.11), mas a região mais

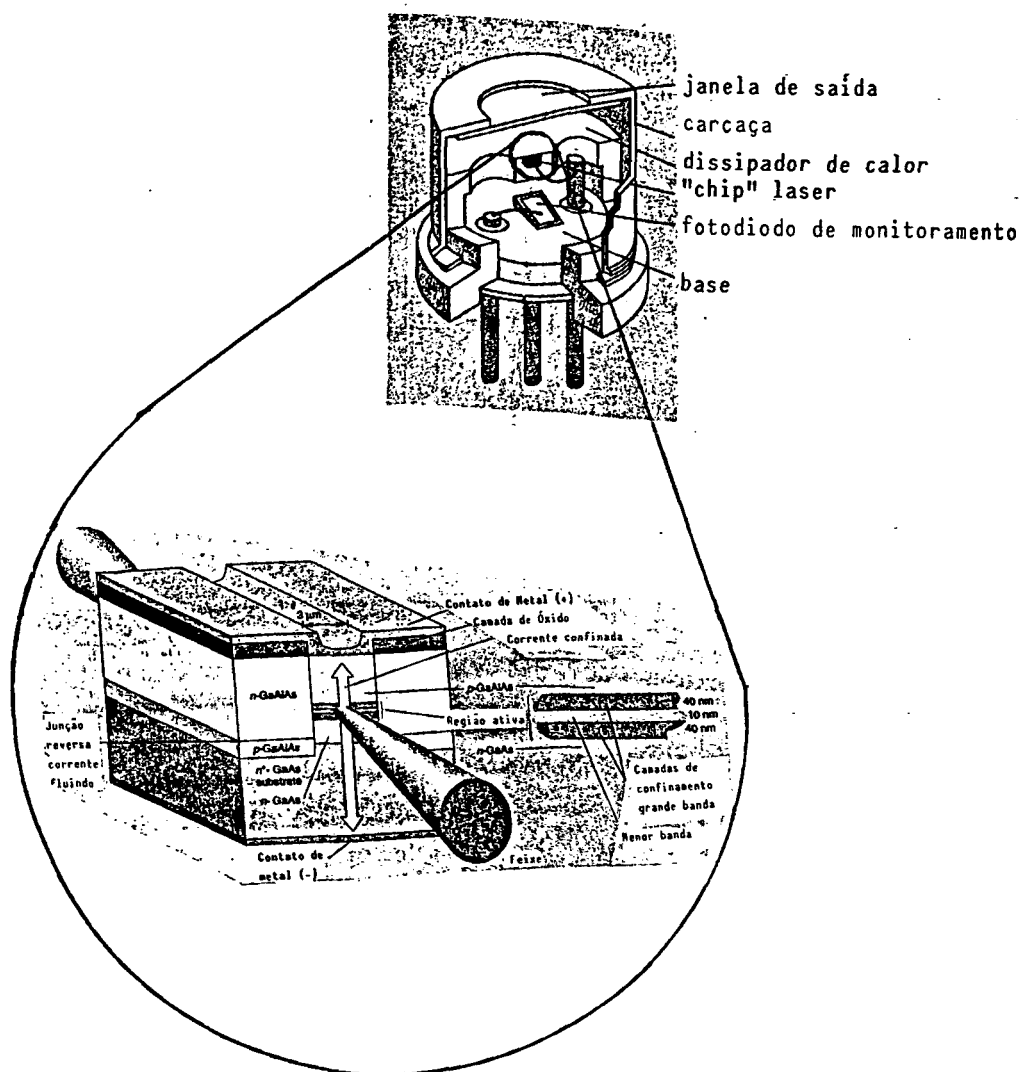


Figura 2.11 - Encapsulamento e estrutura do diodo laser /31,32/

importante para definição de suas características é a junção entre elas. Aplicando uma tensão negativa no material tipo n e uma tensão positiva no material tipo p cria-se uma corrente, que passa pela junção /31,32/.

Na junção, os elétrons livres do material tipo n são "apanhados" pelas lacunas do material tipo p , gerando energia num processo chamado recombinação. Em semicondutores feitos com material a base de germânio e silício, a energia gerada se transforma em calor. Em

outros, tipo AlGaInP, GaAs, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, etc., grande parte dessa energia é transformada em fótons.

O processo de geração de fótons ocorre em LEDs (*light-emitting diodes*) e semiconductor laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) para geração de radiação luminosa. Entretanto, nos laser existe uma cavidade ressonante composta por dois espelhos parciais dispostos paralelamente um ao outro e localizados nos extremos desta cavidade /33/, provocando a amplificação da emissão de luz.

Na figura 2.12 observa-se a curva característica do diodo laser. No primeiro quadrante, tem-se a potência de saída em função da corrente de entrada - I_{th} (corrente de polarização, tipicamente da ordem de 60mA). No quarto quadrante, tem-se a curva de tensão x corrente - V_{op} (máxima tensão permitida sobre o componente, tipicamente da ordem de 2V). No segundo quadrante, pode-se obter a resposta em corrente do fotodiodo de controle - elemento, usualmente colocado na parte traseira do diodo laser, para monitorar a potência de saída deste (fig. 2.11). A região clara delimitada pelas linhas pontilhadas da figura 2.12, refere-se a região típica de utilização do diodo laser.

2.5.2 - Características do Diodo Laser

A caracterização técnica básica do diodo laser pode ser feita conforme a figura 2.13. Cada uma das características será detalhada a seguir.

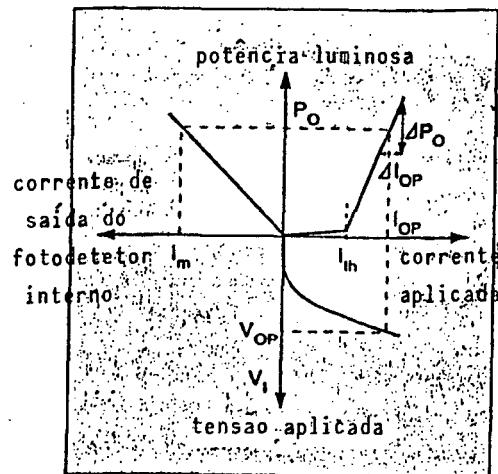


Figura 2.12 - Curva de funcionamento e resposta do diodo laser

/32/

Elétrica	Medição da potência de saída, a queda de tensão, e a corrente do fotodiodo de controle. A análise derivativa destas características fornecem dados de seu desempenho.
Espacial	O perfil da intensidade luminosa de saída nos campos próximos e distantes e a divergência.
Espectral	Dados espectrais são usados para calcular a largura da linha espectral e o comprimento de onda central.
Óptica	Astigmatismo e outros erros na frente de onda.
Dinâmica	Ruído, distorção de intermodulação, tempo de subida, tempo de descida, etc.

Figura 2.13 - Caracterização do diodo laser /34/

a) Elétrica

As características elétricas estão basicamente discriminadas no item 2.5.1.

b) Espacial

O diodo laser não emite um feixe laser colimado e sim um cone divergente, que possui ângulos da ordem de 30° e 12° nos eixos perpendicular e paralelo a região ativa do laser, respectivamente /34/. Num corte transversal do feixe laser, obtém-se a figura de uma elipse com perfil gaussiano, devido as diferentes dimensões na cavidade ativa do laser - tipicamente de 300 a 600 μm de comprimento, 4 a 10 μm de largura e 0.1 a 0.5 μm de altura /32/. Outra importante característica é a divergência espacial, ou seja, quanto o feixe laser oscila em torno de um eixo que passa por sua referência, tipicamente o valor do ângulo formado é de 1° , mas pode chegar até 4° /34/.

c) Espectral

Largura Espectral e/ou Comprimento de Coerência. Existem basicamente dois tipos de emissão espectral para diodo laser: monomodo e multimodo. No monomodo tem-se um comprimento de onda central bem definido, no caso do multimodo, o comprimento de onda central "disputa" a emissão com outros comprimentos de onda, que também são emitidos pela cavidade laser /34/. Um comprimento de coerência máximo para os atuais diodos laser monomodo é da ordem de 14 a 15m /35/.

d) Variação do comprimento de onda (*Lasíng Wavelength*)

É a mudança do comprimento de onda emitido pelo diodo laser. Dois fatores são responsáveis por esta mudança: a alteração na corrente de operação e a variação na temperatura (fig. 2.14). Na figura 2.14.a percebe-se que o comprimento de onda possui modos (patamares) de operação em diferentes comprimento de onda que, no caso, são dependentes da corrente. O coeficiente típico para este caso é $10^{-3}\text{nm/}\mu\text{A}$ em lasers de 830nm /34/. Na figura 2.14.b, tem-se esta dependência em relação a temperatura. O coeficiente típico para o caso é $0.25\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ em dispositivos de 780nm /34/.

e) Óptica

Para aplicações onde é necessário a focalização do feixe deve-se ter ciência do astigmatismo presente nos diodos lasers. Astigmatismo é uma característica proveniente da aparente emissão do feixe laser em pontos distintos dentro da cavidade laser. Isto causa a focalização do feixe em pontos distintos, por exemplo, para as orientações normal e paralela ao feixe (fig 2.15), resultando numa "nuvem" focal /32,35/.

f) Dinâmica

Ruído ou instabilidade de potência. É a flutuação da intensidade do sinal de saída. Tem por origem a oscilação da corrente na junção *pn*, a oscilação da temperatura, e os "pulos" dados entre os modos de operação do comprimentos de onda, que por sua vez tem origem na flutuação da temperatura e corrente. Como a potência de saída é diretamente proporcional a corrente injetada na junção, deduz-se que, com a oscilação desta, ocorre também

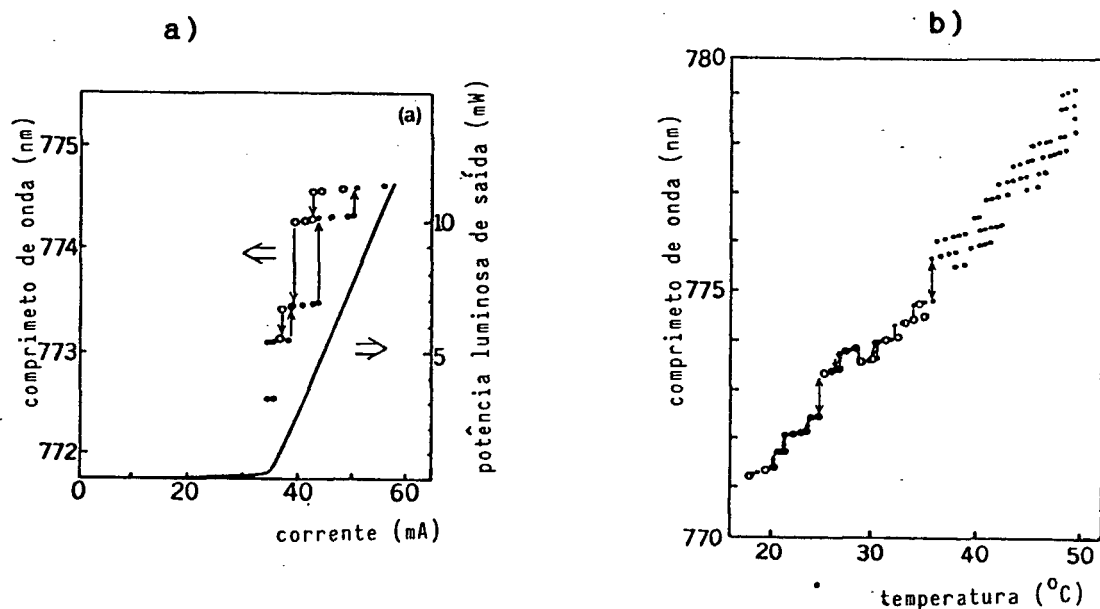


Figura 2.14 - Variação do comprimento de onda do diodo laser /33/

a) em função da corrente de operação

b) em função da temperatura

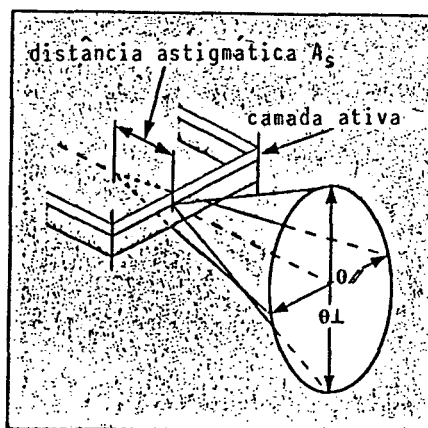


Figura 2.15 - Astigmatismo no diodo laser /32/

a oscilação da potência luminosa na saída. Observando-se a figura 2.14 percebe-se que existem certos "modos" preferenciais de comprimento de onda emitidos pelo diodo laser - fato explicado pela teoria do ressonador de Fabry-Perot /33,36/. Cada "modo" tem um padrão de energia, e supondo-se que a potência de entrada do diodo laser não oscile, há uma oscilação na potência de saída do diodo para compensação da oscilação devido a competição de modos. E como já foi dito, a concorrência entre modos é propiciada pelas alterações de corrente e temperatura. Para o caso típico, a flutuação da potência do laser não é maior que 10% do nível *dc* /37/. Na figura 2.16, vê-se um caso típico da variação da potência em função da corrente e temperatura. Através desta figura pode-se inferir que com a flutuação dinâmica da corrente e temperatura tem-se também uma flutuação da potência luminosa de saída do laser.

2.5.3 - Fotodetetor

O fotodetetor é um transdutor de estado sólido usado para converter energia luminosa em energia elétrica. Quando um par elétron-lacuna é gerado, dentro de uma junção *pn*, pela absorção de um fóton, o campo elétrico interno causará a separação deste par elétron-lacuna, provocando o surgimento de uma tensão ou corrente elétrica, dependendo das condições externas do dispositivo /36/.

Várias técnicas para a fabricação de fotodetetores têm sido desenvolvidas, entretanto, para dispositivos de alta resolução, a construção por difusão plana - mais utilizado em fotodetetores de

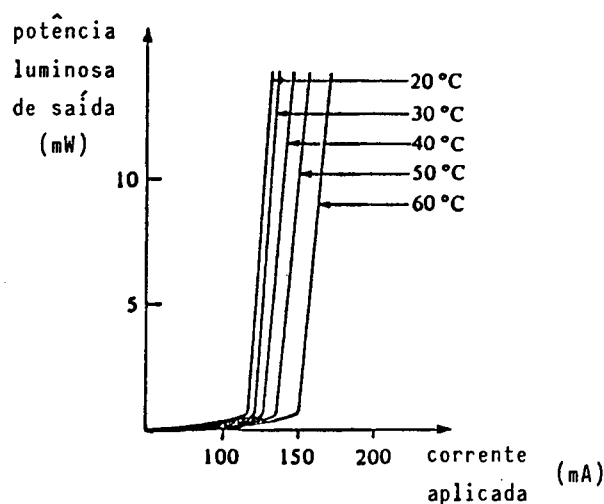


Figura 2.16 - Variação da potência luminosa de saída do diodo laser em função da corrente e temperatura /36/

Intensidade - e a por barreira Schottky - mais utilizado em fotodetetores de posição - são as mais empregadas /38/.

Dispositivo de difusão plana são produzidos pela difusão do boro (dopante do tipo *p*) e fósforo (dopante tipo *n*), dentro, em lados opostos, de um material a base de silício de alta resistividade, ou intrínseco, formando o chamado fotodiodo PIN (fig. 2.17). Sua utilização é predominante em dispositivos de área pequena ou média, pois proporcionam baixo ruído e excelente estabilidade /38/.

2.5.4 - Modos de operação e características do fotodetetor de intensidade

Existem dois modos de operação para fotodetetores de intensidade:

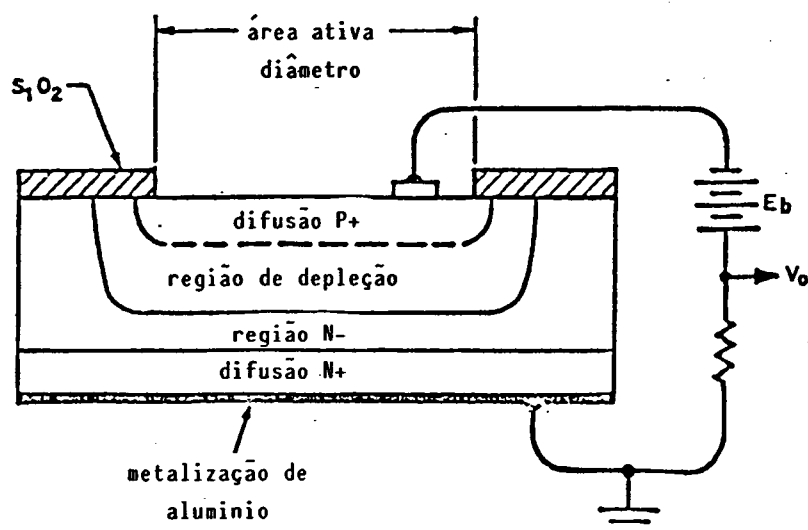


Figura 2.17 - Estrutura do fotodiodo PIN /38/

- fotovoltaico, se o dispositivo é mantido em circuito aberto, uma determinada tensão aparece nos terminais p e n ;
- fotocondutivo, se o dispositivo estiver curto-circuitado, ou mais usualmente, operando sob uma tensão reversa, uma corrente fluirá entre as regiões p e n /36/.

Como principais características do modo de operação fotocondutivo, com relação ao fotovoltaico, citam-se /36,39/:

- rápido tempo de resposta;
- baixo ruído;
- maior faixa dinâmica;
- linearidade de resposta;
- boa estabilidade.

E para o modo de operação fotovoltaico /39/:

- ultra alta impedância;
- ultra baixo ruído $1/f$;

- sem corrente de escuro.

A seguir far-se-á uma análise das principais características dos fotodetetores de intensidade.

a) Resistência *Shunt*, R_{sh}

Um fotodiodo pode ser representado por uma fonte de corrente com uma resistência *shunt* em paralelo e uma resistência série R_s em série (fig 2.18). Idealmente ter-se-ia $R_{sh} = \infty$ e $R_s = 0$ /40/. Resistência *shunt* é equivalente a rampa na origem da curva I-V (fig. 2.19). Em fotodetetores otimizados para operação fotocondutiva a resistência *shunt* tem boa proximidade da ideal, ou seja $R_{sh} \rightarrow \infty$. Agora, para os fotovoltaicos, a magnitude da resistência *shunt* está diretamente relacionada com o ruído e a linearidade de resposta /41/. Exemplo: $R_{sh} = 10M\Omega$ /40/.

b) Resistência Série, R_s

É diretamente dependente da resistividade do silício (tipicamente de 8 a $4000\Omega\text{-cm}$ da espessura da área ativa /42/) da tensão de operação e da qualidade do contato com os eletrodos /42,40/. Resistência série é um importante parâmetro a ser considerado em operações de alta frequência /42/, e apresenta como valor típico de 50 a 500Ω /40/.

c) Capacitância de junção, C_j

Cresce com o aumento da área ativa e decresce com o aumento da tensão de polarização. A capacitância de junção, em conjunto com a resistência de entrada e a resistência série, produz a constante de tempo RC do sistema, que afetará o tempo de

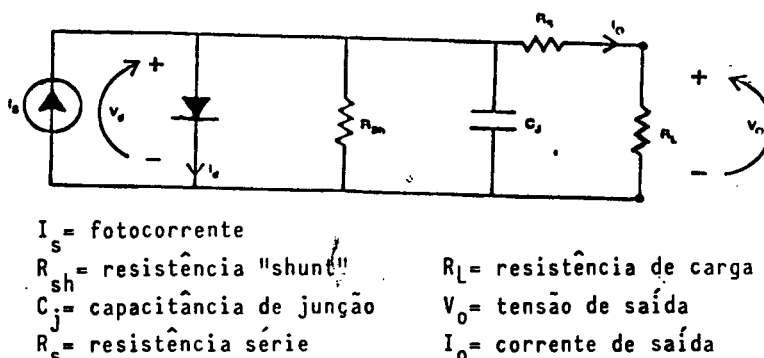


Figura 2.18 - Circuito equivalente de um fotodiodo PIN /40/

carga/resposta do fotodiodo /42/. A capacitância de junção é tipicamente 3000pf/cm^2 @ $V=10\text{V}$ na área ativa /41/. Sua dependência com a temperatura pode ser desconsiderada para a maioria das aplicações práticas.

d) Características I-V

A figura 2.19 mostra uma curva I-V típica do fotodiodo. A linha pontilhada, a direita do eixo das ordenadas delimita a operação no modo fotocondutivo. A esquerda do eixo das ordenadas, encontram-se as linhas pontilhadas delimitadoras da operação no modo fotovoltáico. Numa condição de total escuridão sobre o fotodiodo aparece uma corrente, denominada corrente de escuro (fig. 2.19) que é função da polarização aplicada, da temperatura e da área ativa de recepção. Percebe-se que esta corrente influencia somente o modo de operação fotocondutivo /40/.

e) Responsividade

A responsividade de um fotodiodo é a medida de sua sensibilidade à luz e é definida como a razão da fotocorrente (ampére) para a potência luminosa incidente (Watt). A responsividade máxima

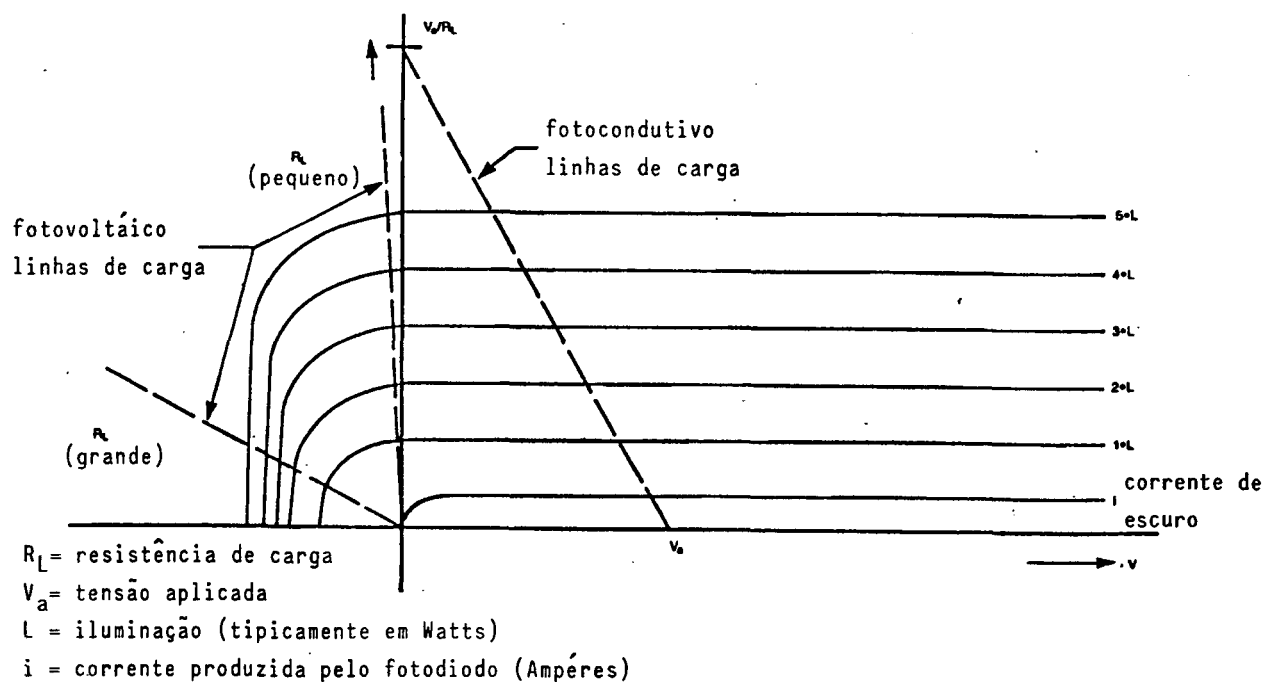


Figura 2.19 - Curva (I-V) característica dos fotodiodos /40/

ocorre entre 850 e 950nm, para os fotodetetores de Silício, e é tipicamente 0.3 a 0.5A/W no pico /40/. A responsividade varia com a variação do comprimento de onda e muito pouco com a variação da tensão e temperatura. O silício tem diferentes índices de reflexão e refração para diferentes comprimentos de onda, afetando assim a responsividade do fotodiodo. Para o caso da tensão aplicada, esta afeta o processo de coleta de pares elétron-lacuna. Já a temperatura, provoca uma mudança nas constantes ópticas da célula e também no processo de coleta.

f) Circuito Equivalente

A figura 2.18 mostra o circuito equivalente para os fotodiodos de silício. Na figura são vistos todos os parâmetros característicos do fotodiodo e sua distribuição segundo um

diagrama elétrico. Os parâmetros do circuito estão relacionados com o tempo de resposta do fotodiodo que é tipicamente menor que 100ns para o fotocondutivo e maior que 90ns para o fotovoltálico /40/.

g) Ruído

Os ruídos presentes num fotodiodo têm basicamente duas fontes: o ruído de corrente (*shot current noise*) no próprio fotodiodo e o ruído térmico. O ruído *shot* está relacionado com a corrente de escuro, ou com a corrente reversa que passa pelo dispositivo. A corrente de ruído térmico pode ser gerada na resistência série, resistência *shunt* e resistência de carga, esta pode ser calculado pela fórmula de ruído Johnson:

$$i_N = \sqrt{\frac{4K.T.B}{R}} \quad (2.1)$$

onde:

K = constante de Boltzmann (1.33×10^{-23} J/K)

T = Temperatura (K)

B = Largura de bando do ruído (Hz)

R = Resistência em questão

h) NEP (*Noise Equivalent Power*)

É a figura de mérito usada para determinar o mínimo sinal detectável, ou seja, para produzir uma corrente igual a corrente de ruído gerada pelo fotodiodo. Seu valor típico é /42,40/: $< 5 \times 10^{-12} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ fotocondutivo e $< 5 \times 10^{-13} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ fotovoltálico.

3 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DE APALPADOR OPTOELETRÔNICO

Para o desenvolvimento do apalpador optoeletrônico, utilizou-se o princípio do apalpador por interrupção de feixe, com alteração no que diz respeito a detecção das fronteiras claro/escuro, que naquele se dá pela projeção do perfil da peça sobre um anteparo, obtendo-se suas fronteiras com o sensoriamento desta projeção. Neste o sensoriamento é feito por um fotodetector que monitora um feixe laser que é obstruído/desobstruído pela própria peça sob medição.

Na figura 3.1 tem-se uma visão do apalpador a ser desenvolvido - apalpador optoeletrônico bidirecional. O apalpador é constituído basicamente por um arco rígido, um emissor e um receptor de feixe laser. Pelo deslocamento do apalpador, nas direções perpendiculares à de propagação do feixe, ao longo da peça sob medição, consegue-se determinar todas as grandezas de interesse relacionadas ao perfil da peça.

3.1 - CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS

Para um bom desempenho operacional, o apalpador deve ter algumas características, a seguir delineadas.

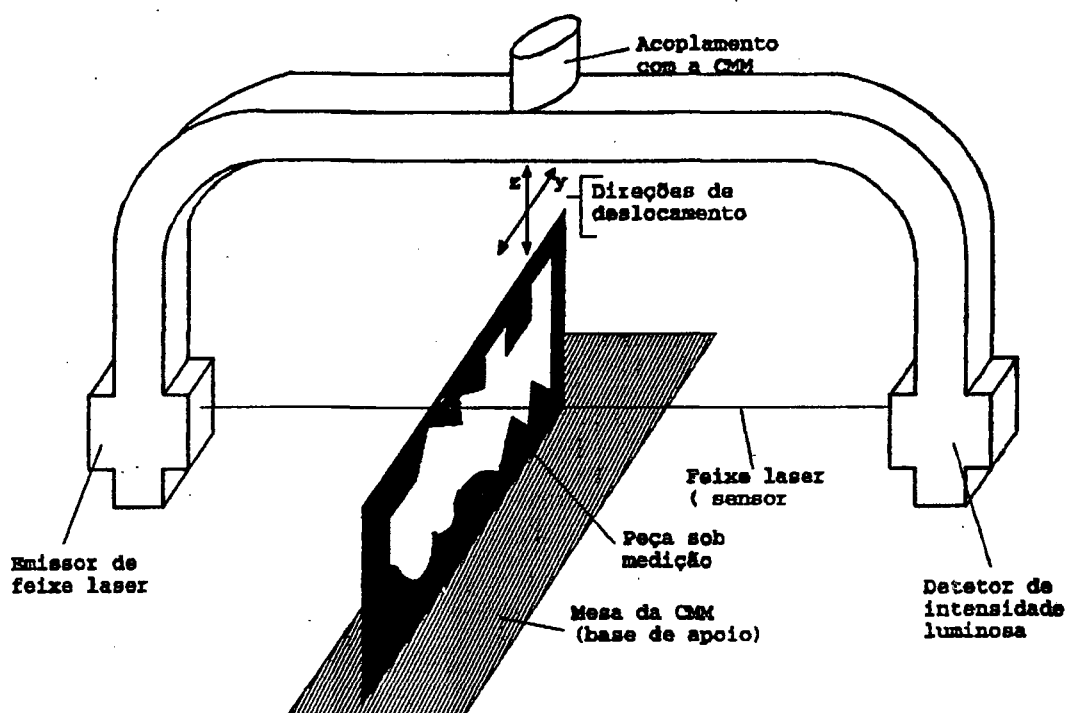


Figura 3.1 - Esquema do apalpador optoeletrônico de perfil para máquina de medir por coordenadas

Quanto ao objeto a medir, o apalpador deve permitir a medição de diferentes formas (geometrias), sem que para tal seja necessário a alteração de algum parâmetro ou a modificação de algum componente. Por suas particularidades - sensoriamento por interrupção de feixe e possibilidade de medição sem contato - ele se presta, por exemplo, a medição de: perfis no plano y-z, diâmetros, passo, ângulo de flanco, diâmetro de roscas, etc, ou seja, todas as peças passíveis de medição em projetores de perfis.

Quanto as características operacionais, o apalpador deve permitir uma medição simples e rápida, bastando fazer-se uma varredura programada ao longo dos eixos y e z. A velocidade de apalpação deve

ser alta já que na utilização de um apalpador optoeletrônico a medição é dinâmica.

No que diz respeito as características físicas, o apalpador deve atender aos requisitos determinados pela máquina, por exemplo: massa dentro dos limites permitidos por esta (usualmente valores menores que 850g /8,26,43/), tempo de resposta condizente com a velocidade de apalpação (para um caso típico de 5mm/s de velocidade de medição e uma resolução de 0.1 μ m, o apalpador deve ter um tempo de resposta menor que 20 μ s), e dimensões condizentes do eixo para um perfeito acoplamento ao braço de medição da máquina.

Com relação as características metrológicas, o apalpador deve ter compatibilidade metrológica com a CMM. Usualmente as melhores máquinas do mercado apresentam uma incerteza de medição na ordem de $\pm 1\mu$ m. Como em uma CMM o erro do apalpador não é a única fonte de erro, este deve ter uma incerteza de medição aquém da incerteza da CMM, para que não comprometa o seu desempenho. Tendo-se presente que a CMM, incluindo o apalpador, deve ser metrologicamente adequada as tolerâncias e geometrias das peças a medir.

3.2 - DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

Na figura 3.2 apresenta-se um diagrama esquemático do protótipo a ser desenvolvido. Para um melhor entendimento, o apalpador foi dividido em módulos, a saber: gerador de feixe laser, transdutor e arco.

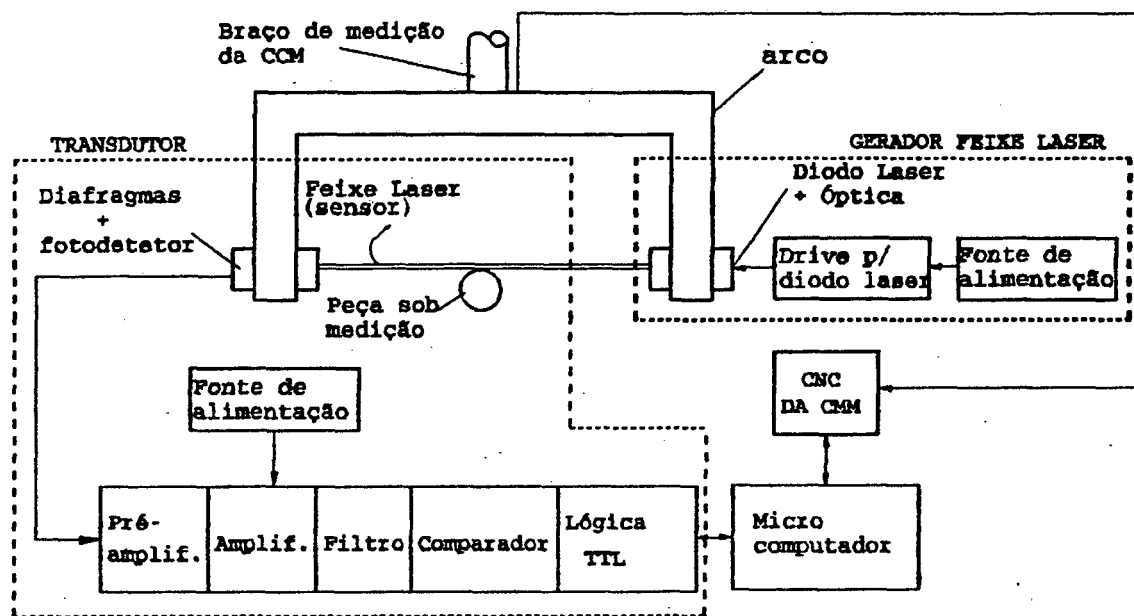


Figura 3.2 – Diagrama esquemático do apaipador optoeletrônico e sua conexão com a CMM

A seguir será apresentado o detalhamento de cada módulo, uma explicação do funcionamento e uma análise genérica dos erros.

3.2.1 – Módulos

O gerador de feixe laser gera um feixe laser colimado e com alta densidade de energia, na ordem de unidades de mW/mm^2 . Isto é necessário para que se tenha o maior sinal luminoso (laser) possível, pois este sinal, e o elétrico correspondente, devem ter o mínimo ruído possível, sabendo-se que quanto menor for o sinal menor será a relação sinal/ruído. Para isso, foi utilizado um diodo laser, um circuito controlador/limitador de corrente e uma fonte

de alimentação. Ressalta-se que os dois últimos submódulos não estão acoplados ao arco.

O transdutor converte o sinal luminoso (feixe laser) em sinal elétrico padrão TTL. É composto pelos seguintes submódulos:

- sensor - primeiro estágio na cadeia de medição, está em contato direto com a grandeza a medir - é o próprio feixe laser, propiciando a medição sem contato mecânico;
- diafragmas, para diminuição do diâmetro do feixe laser, isto para aumentar a resolução do apalpador e para não permitir a passagem de raios não paralelos ao eixo óptico, que são fontes de erro;
- fotodetector, converte o sinal luminoso em sinal elétrico proporcional, é o componente chave do transdutor;
- pré-amplificador, para amplificação e filtragem prévia do sinal, deve ser de boa qualidade para gerar o mínimo de ruído possível;
- amplificador, amplificação do sinal, com ganho ajustável para compatibilizar o sinal com o sinal necessário para o filtro e comparador;
- filtro, para minimizar os ruídos presentes no sinal, os quais são fontes de erro;
- comparador, para comparar o sinal luminoso, já convertido, com um sinal de referência, que pode ser ajustado para eliminar-se o erro sistemático;
- lógica TTL, converte o sinal analógico em sinal digital, compatibilizando-o com a entrada de sinal da CMM;
- fonte de alimentação, fornecimento de energia para os diversos submódulos.

Destes módulos, somente os diafragmas e o fotodetector estão acoplados ao arco.

Arco em formato de "U", para possibilitar o "envolvimento" da borda da peça com o mesmo, ou seja, pode-se fazer a varredura do perfil da peça pela simples movimentação do apalpador sobre a mesma.

3.2.2 - Funcionamento

Para o entendimento do funcionamento do apalpador, pode-se observar a figura 3.1 e 3.3. O apalpador movimenta-se acoplado ao braço de medição da máquina, quando este "toca" a peça o feixe laser começa a ser interrompido e há um decaimento gradual na intensidade luminosa incidente sobre o fotodetector (fig.3.3). Conseqüentemente, há o decaimento do sinal na saída do amplificador. Quando o feixe está interrompido pela metade, o sinal elétrico na saída do amplificador também está na metade do sinal máximo (claro) e torna-se igual ao sinal de referência. No instante seguinte aquele está menor que este e o comparador chavela, provocando a queda do sinal na sua saída e a partir disto a lógica TTL gera um pulso que dispara a rotina de leitura das coordenadas da máquina. O feixe permanece interrompido durante toda a passagem pela peça, com os sinais analógicos em baixa (escuro). Quando o feixe começa a ser desobstruído, os sinais analógicos começam a subir - processo inverso a obstrução - e geram um novo pulso TTL, que novamente dispara a rotina para leitura das coordenadas da máquina. Com o processamento dessas coordenadas é possível a obtenção da dimensão (em questão) da peça.

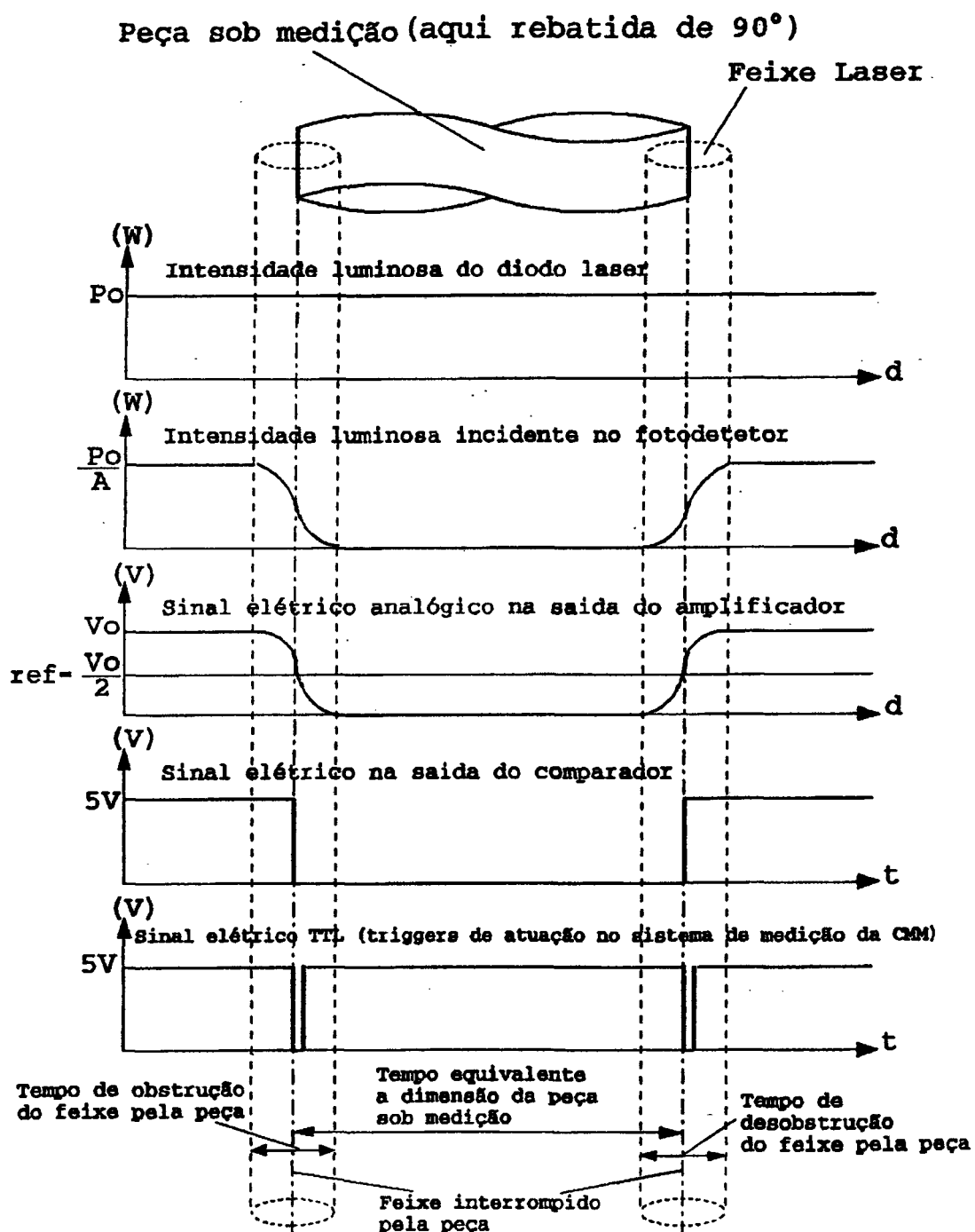


Figura 3.3 - Princípio de funcionamento do apalpador optoeletrônico e sua comunicação com a CMM

3.2.3 - Fontes de Erro

Como quesito básico para o bom funcionamento do apalpador deve-se proceder ao alinhamento entre o apalpador e a peça sob medição, para que não ocorram erros de 1ª ordem (cosseno). A figura 3.4 mostra um exemplo de como pode acontecer este tipo de erro e como ele pode afetar os valores medidos. Este tipo de erro não será considerado no equacionamento, por entender-se que ele é dependente do operador e principalmente dos dispositivos disponíveis para o alinhamento, ou seja, uma característica da CMM.

Para determinar as fontes de erro do apalpador propriamente dito, pode-se fazer uma análise segundo seus módulos e submódulos. Na figura 3.5 tem-se um esquema das possíveis fontes de erros em cada um desses módulos/submódulos. Cabe ressaltar que perturbações ambientais, do tipo lufadas de ar e variações de temperatura e umidade, podem comprometer o bom funcionamento de todos componentes. Mas serão desprezados no presente trabalho, devido ao rígido controle ambiental existente no laboratório de trabalho.

A fonte de alimentação do gerador de feixe laser pode provocar oscilações de tensão, potência e ruído que se transmitirão ao diodo laser. O circuito de alimentação e controle do diodo laser pode gerar oscilações na corrente e ruído que também vão afetar o desempenho do mesmo. O diodo laser pode gerar instabilidade de potência e instabilidade espacial. E, finalmente, a parte óptica pode provocar aberrações no feixe laser. Destas fontes, as que efetivamente influenciarão são as que provocam a instabilidade de

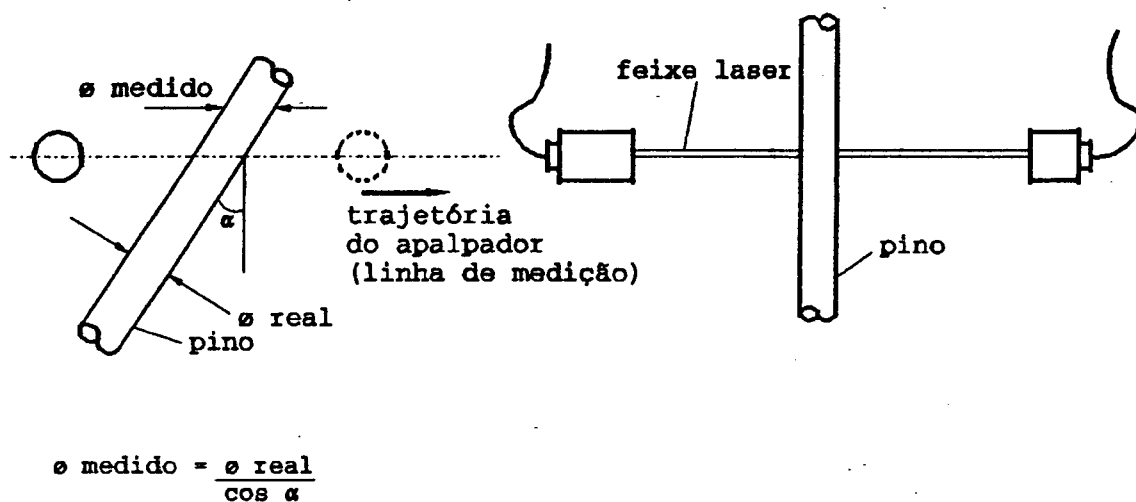


Figura 3.4 - Erro de medição devido a um erro de posicionamento

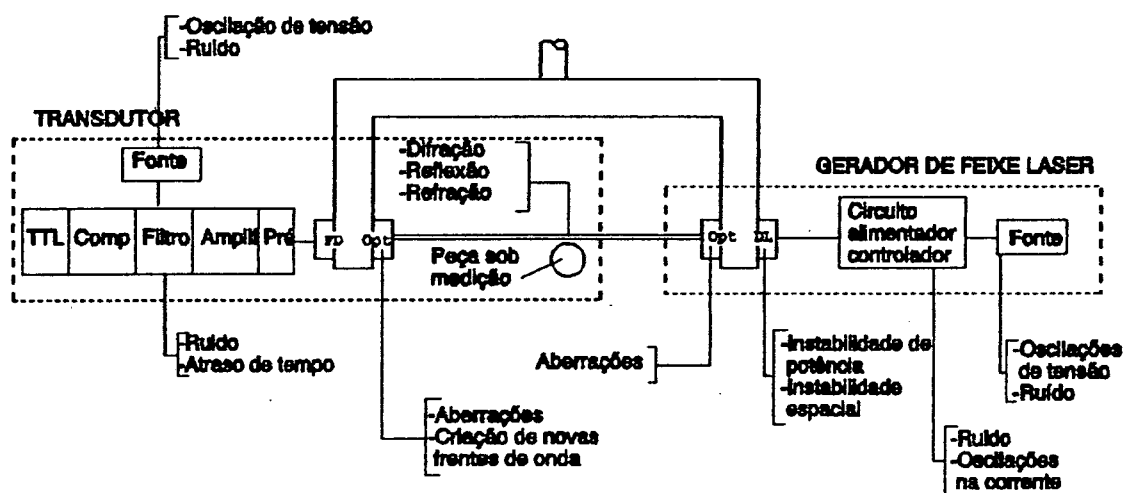


Figura 3.5 - Fontes de erro no apalpador

potência do diodo laser, já que serão efetivamente detectadas pelo fotodetector. No caso da instabilidade espacial, esta é bastante minimizada pelos diafragmas, que permitem somente a passagem da parte central do feixe ($\approx 1\%$), mantendo sempre constante o eixo óptico. As aberrações são eliminadas pelo fato de fazer-se uma única montagem com calibração, e portanto não existindo movimento relativo entre os componentes ópticos.

No contato feixe laser/peça (sensoriamento) pode aparecer o erro devido ao espalhamento de luz, causado pela perturbação da peça às frentes de onda eletromagnéticas planas, que podem ser estudados como combinação de três fatores: reflexão, refração e difração /44/. Na figura 3.6 tem-se um esquema de como isto pode ocorrer com um cilindro.

A difração para casos em que o comprimento de onda é muito menor que o diâmetro da peça (≈ 20 vezes), o feixe luminoso proveniente da sua borda é independente do material e da geometria da secção (arredondada ou aguda) /45/. Logo, a difração na borda da peça não muda com a mudança do raio de curvatura da peça. Portanto, da análise da figura 3.7 - difração na borda de uma peça - pode-se dizer que existe uma alteração na projeção da sombra, que idealmente deveria corresponder a um degrau com transição claro/escuro no eixo das ordenadas, trata-se de uma alteração sistemática, ou seja, praticamente igual para todas as superfícies.

A reflexão na superfície da peça, provoca uma alteração na curva da figura 3.6, onde, com o aumento do raio de curvatura, aumenta o nível *dc* no primeiro quadrante da curva, tendendo a aumentar a

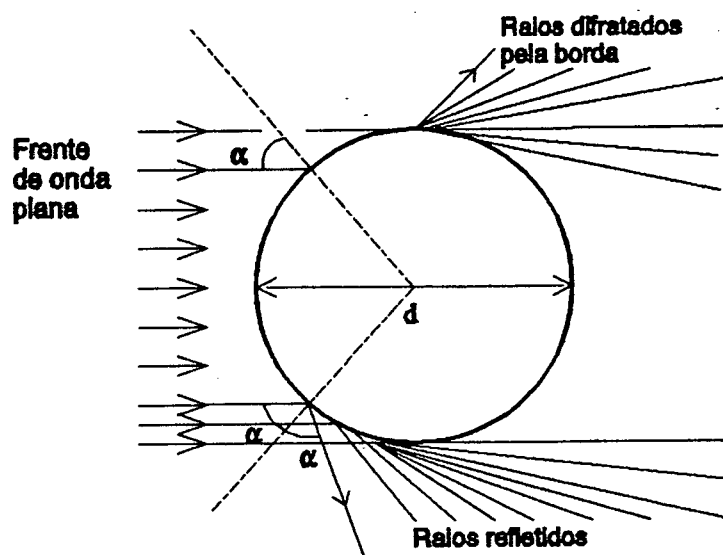


Figura 3.6 - Espalhamento de luz formado pelos fenômenos da reflexão e difração para pinos /44/

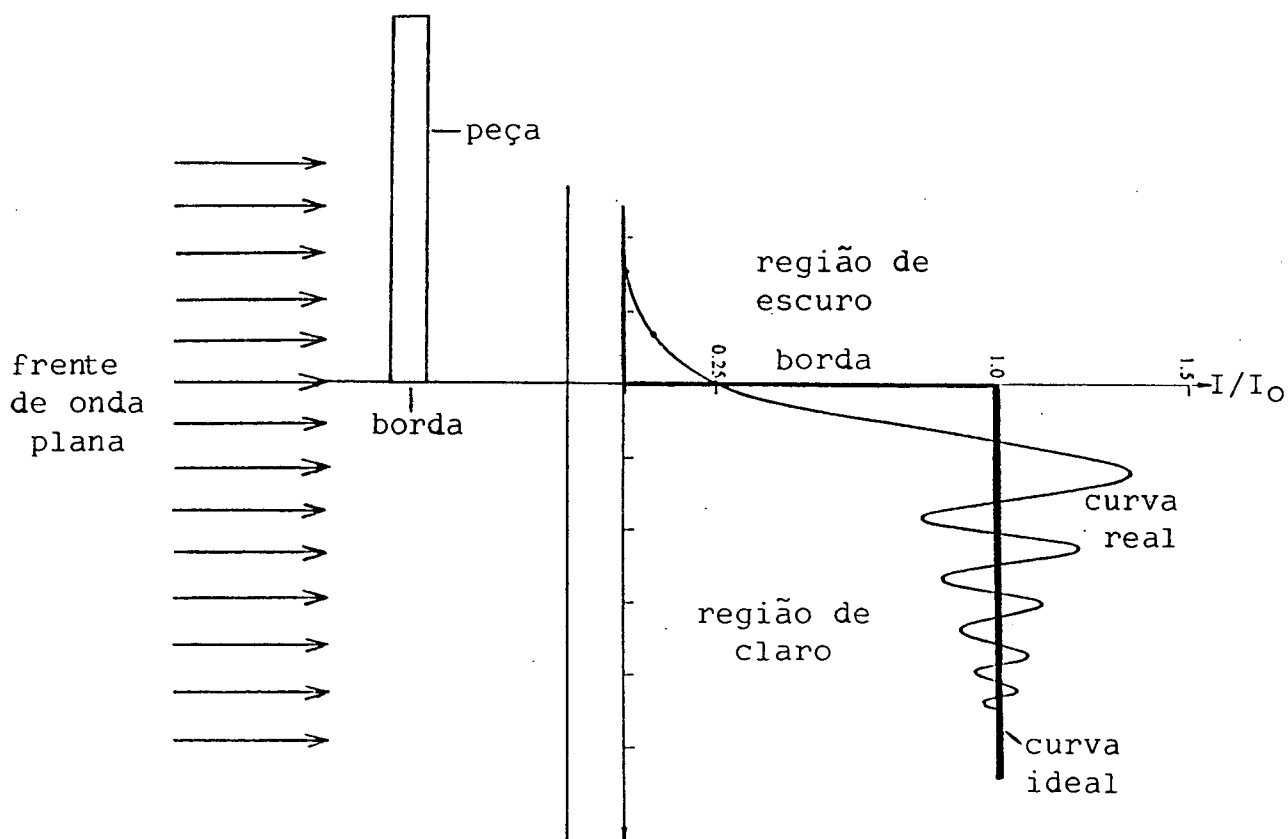


Figura 3.7 - Efeito da difração na borda de uma peça

derivada na primeira ascendente, ou seja, aproximando-se do caso ideal. A reflexão também sofre influências da qualidade superficial do material utilizado na confecção da peça.

Os efeitos da refração podem ser desconsiderados, já que, os propostos objetos a serem medidos são opacos à luz do laser, e portanto não ocorrendo o fenômeno da refração.

Os diafragmas geram aberrações e novas frentes de onda, mas isto não influi significativamente nos erros do apalpador, pois não existe movimentação relativa dos componentes ópticos após a montagem.

Para os demais submódulos do transdutor, o erro é diretamente proporcional ao ruído por eles gerados, quanto mais alto for este ruído, mais deturpado ficará o sinal de saída. O atraso de tempo, não é significativo, pois o tempo de resposta dos componentes é muito menor que o necessário para o sensoriamento das peças.

A armação mecânica deve ser bastante rígida para não contribuir com erros significativos ao apalpador.

3.3 - COMPONENTES OPTOELETRÔNICOS

Os componentes optoeletrônicos são de vital importância ao apalpador. São utilizados por apresentarem características vantajosas no que diz respeito ao pequeno tamanho, praticidade de uso, confiabilidade, etc.

3.3.1 - Diodo Laser

O diodo laser é utilizado por apresentar dimensões reduzidas e alta densidade de energia.

A instabilidade de potência da luz emitida é um dos fatores que pode acarretar em erros do apalpador, devido a indeterminação na detecção do sinal analógico equivalente a uma interrupção do feixe. Para a minimização deste efeito, faz-se uso de um circuito controlador da potência luminosa. Os circuitos controladores comercialmente disponíveis especificam uma instabilidade de potência na ordem de $\pm 0.1\%$ /46/.

Para a construção do protótipo, optou-se por um diodo laser facilmente encontrado no mercado, cujas principais características são /47/:

- fabricante: SHARP;
- modelo: LTO22MC;
- baixo ruído gerado internamente;
- comprimento de onda típico = 780nm;
- monomodo;
- corrente típica de operação = 65mA;
- tensão reversa = 2V;
- potência típica = 3mW.

Como o protótipo será testado em laboratório, sob condições controladas de temperatura ($20.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$) será utilizado somente um circuito controlador/limitador de corrente simples, especificado pelo próprio fabricante (fig. 3.8).

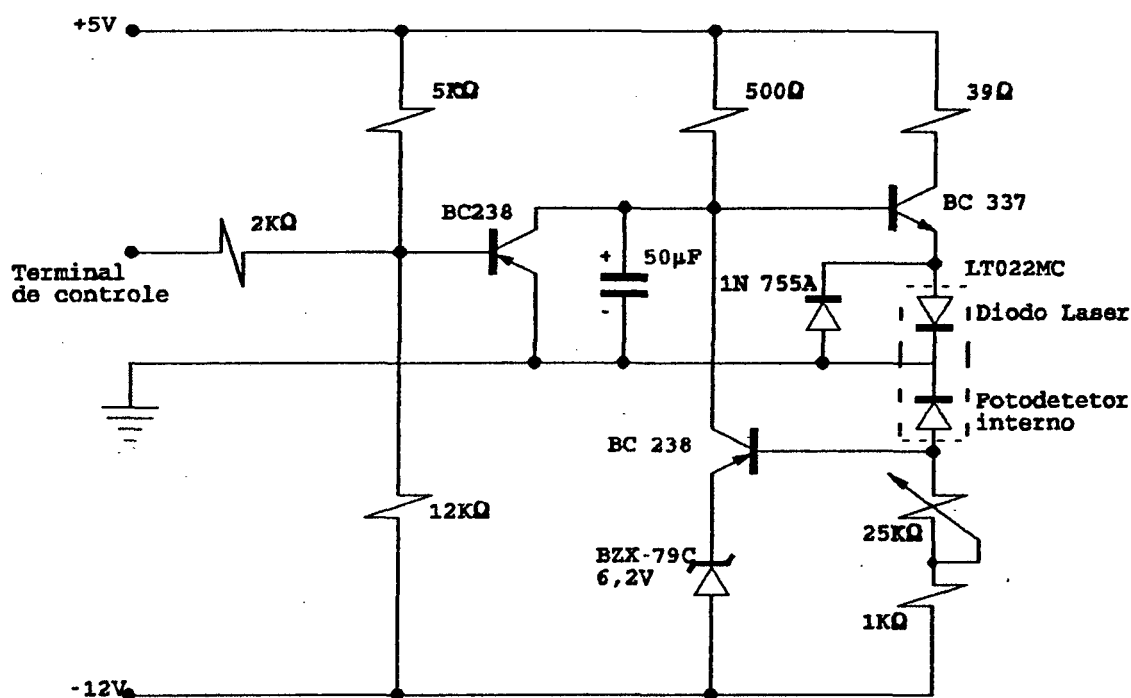


Figura 3.8 - Circuito para alimentação e controle do diodo laser

3.3.2 - Fotodetetor

O fotodetetor deve ter um baixo ruído (para que não haja a mascaração do resultado pelo mesmo) um tempo de resposta compatível com a CMM (para que não ocorram atrasos significativos desde o contato com a peça até a efetiva leitura das coordenadas por esta) e pequenas dimensões.

Sendo o ruído uma das características mais críticas deve-se trabalhar com o fotodetetor no modo fotovoltáico (ítem 2.5.3), que é o modo de operação de menor ruído, basicamente por não apresentar corrente de escuro.

Com o diâmetro do feixe laser colimado da ordem de 2.5mm, a potência total da ordem de 3mW e a responsividade do fotodetector de 0.5A/W, observou-se que a potência incidente sobre o fotodetector, após "passar" pelo diafragma externo de 30 μ m, é da ordem de 430nW e a corrente na saída do fotodetector é na ordem de 220nA.

Por disponibilidade, a opção foi um fotodetector da série de fotocondutivos, que tem pequena área e, portanto, corrente de escuro baixa (suficiente para não comprometer o desempenho do protótipo). Este fotodetector tem as seguintes especificações /40/:

- fabricante: UDT;
- modelo: PIN-040A;
- baixo ruído;
- área ativa = 0.81mm²;
- responsividade = 0.5A/W @ 850nm;
- corrente de escuro = 0.3nA @ 10V;
- NEP @ -10V = 1×10^{-14} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 850nm/1kHz;
- tempo de subida típico = 3ns @ 830nm e entrada 50V/50 Ω .

3.4 - COMPONENTES ÓPTICOS

Os componentes ópticos devem respeitar as restrições de tamanho e requisitos ópticos - colimação, diminuição do diâmetro do feixe laser, e outros - impostos ao apalpador. A figura 3.9 mostra a disposição geométrica dos componentes ópticos empregados no protótipo. A seguir será feita uma descrição e caracterização desses componentes.

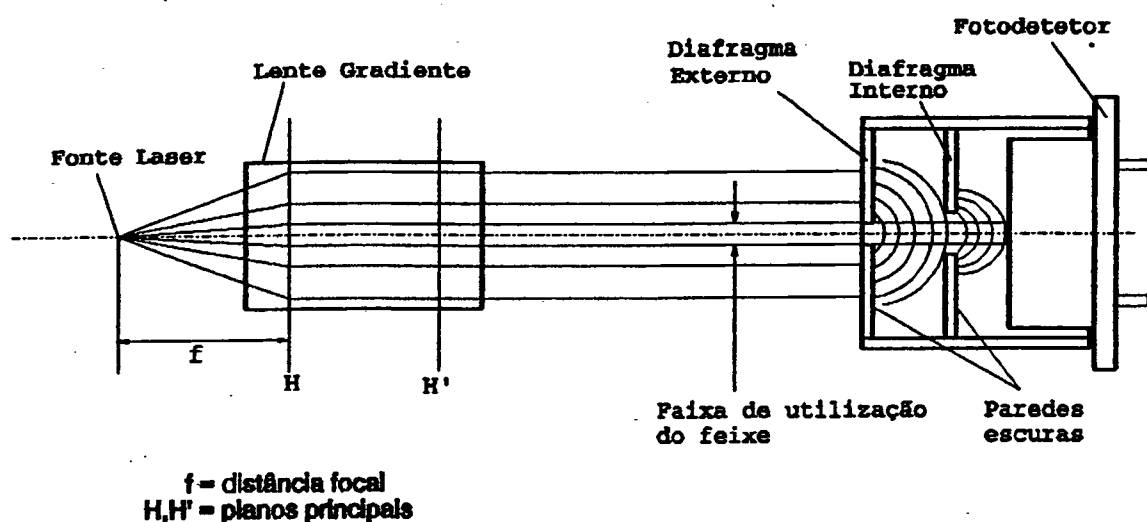


Figura 3.9 - Disposição óptica geométrica do apalpador optoeletrônico

3.4.1 - Lentes

Como solução clássica para colimação do feixe laser poder-se-ia utilizar duas ou mais lentes, com problemas de alinhamento e dimensões. Optou-se pela utilização de uma lente gradiente, que propicia vantagens /46,48/ como:

- correção de aberrações esféricas sem sistemas multi-elementos — complexos ou sistemas asféricos;
- simplicidade da geometria das lentes;
- pequenas dimensões.

A lente a ser utilizada é uma lente, comercialmente disponível, especialmente desenvolvida para o diodo laser em questão, levando

em conta parâmetros como: comprimento de onda, dimensões, densidade de energia, etc.

3.4.2 - Diafragmas

Sabendo-se que o sinal de saída do amplificador deve ter sempre a mesma tensão para o feixe desobstruído, independente do diâmetro desse feixe, pode-se afirmar que quanto menor o diâmetro do feixe incidente sobre o fotodetector, melhor será a resolução na determinação do ponto central desse feixe. Para tal, optou-se pela interrupção parcial do feixe através de um diafragma colocado junto ao fotodetector, diafragma externo (fig. 3.9).

Coloca-se um segundo diafragma (diafragma interno, fig. 3.9), entre o primeiro e o fotodetector, para bloqueio dos raios luminosos não paralelos ao eixo óptico. Isto evita parcialmente a interferência de raios luminosos provenientes da: difração e reflexão sobre a peça e meio ambiente. Raios estes prejudiciais ao perfeito funcionamento do sistema.

O diafragma externo utilizado foi um modelo comercial de 30 μ m de diâmetro. O diafragma interno foi usinado, e tem um diâmetro aproximado de 600 μ m. Este é um valor ponderado entre a parcela desnecessária de raios (raios não paralelos ao eixo óptico) e a parcela necessária de energia luminosa para excitar o fotodetector.

3.5 - COMPONENTES ELETRÔNICOS

A eletrônica tem por função converter os sinais advindos do fotodetector e compatibilizá-los com a entrada de sinais da CMM, (fig. 3.10). As grandes preocupações em sua especificação, como no caso do fotodetector, são a velocidade e o ruído. Quanto ao requisito de velocidade, a grande maioria dos componentes eletrônicos pode atendê-lo. Com relação ao requisito de ruído, quanto menor, melhor. Para tal, deve-se ter ciência de que o elemento crítico é o pré-amplificador ou conversor de transimpedância, pois o seu sinal de entrada deverá ser muito baixo e ter um grande ganho. Para desempenhar tal função foi escolhido um amplificador operacional com as seguintes características /49/:

- fabricante: ANALOG DEVICES;
- modelo: AD549L;
- baixa corrente de polarização: máximo 60fA;
- baixa corrente de ruído na entrada: 0.36fA_{p-p} @ 0.1 até 10Hz;
- razão de subida, *slew rate*: 3V/ μ s.

Quanto aos outros componentes eletrônicos, cabe dizer que podem ser utilizados componentes sem grandes características especiais mas, tendo-se sempre em mente os quesitos de velocidade e ruído.

Os ganhos a serem utilizados no primeiro e segundo estágios são aproximadamente 80×10^3 e 580 (82×10^3 e 220 na prática), respectivamente. Isto para que se tenha uma tensão de 10V na saída do segundo estágio de amplificação.

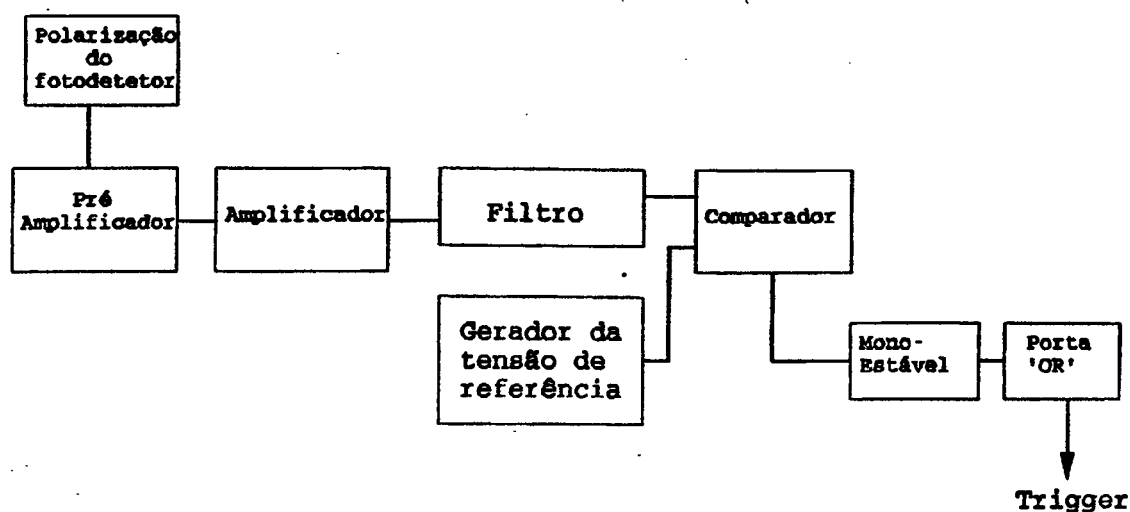


Figura 3.10 - Diagrama de blocos do circuito do transdutor

3.6 - ARCO

O arco tem por objetivos: dar a forma de "U" Invertido, sustentação aos componentes nele acoplados e rigidez ao apalpador. É necessário que atenda alguns requisitos a seguir explicitados.

Com relação ao material não fez-se nenhum equacionamento quanto a sua estabilidade dimensional quando da mudança das condições climáticas, pois o apalpador será utilizado dentro de laboratórios com condições climáticas controladas.

3.6.1 - Tolerâncias

Para que o sistema funcione a contento, é necessário respeitar-se um alinhamento mínimo do sistema óptico.

Na figura 3.11 vê-se a possível influência de um desalinhamento dos componentes ópticos. Com deslocamentos transversais ou longitudinais da fonte laser, tem-se um erro angular em relação ao eixo óptico, e uma colimação ou não do feixe, respectivamente. Para que tais erros não sejam significativos, são especificadas tolerâncias, que serão discriminadas a seguir:

a) Tolerância de Localização de Concentricidade

Tolerância de localização de concentricidade de $\pm 0.2\text{mm}$ entre o centro do feixe laser colimado e o centro dos diafragmas, para que se tenha o aproveitamento da parte central - maior densidade de energia - do feixe laser de perfil gaussiano. De posse disto, e sendo $f = 3\text{mm}$ e $\alpha = 0.19''$ (para a equação da figura), calculado a partir da condição acima, chega-se a conclusão de que o máximo valor de x - tolerância de forma de concentricidade entre a fonte laser e o eixo óptico (fig.3.11) - é $9\mu\text{m}$.

b) Tolerância de Localização de Posição

Para que a colimação do feixe laser ocorra, é necessário que a fonte esteja no ponto focal da lente, ou dentro de certos limites, que leva ao estabelecimento de tolerâncias de localização de posição. Para calcular tal tolerância estabelece-se como limite uma distância focal, a direita da lente, de 5 vezes a distância entre o diodo laser e o fotodetector (fig. 3.11). De posse disto e tendo-se que $f = 3\text{mm}$, $p = 3 \pm \Delta$ e $p' = 5 \times 70\text{mm}$ (na equação da figura) - pode-se obter que $\Delta = \pm 26\mu\text{m}$. Esta é a tolerância de localização de posição da fonte laser para o plano principal (H) da lente.

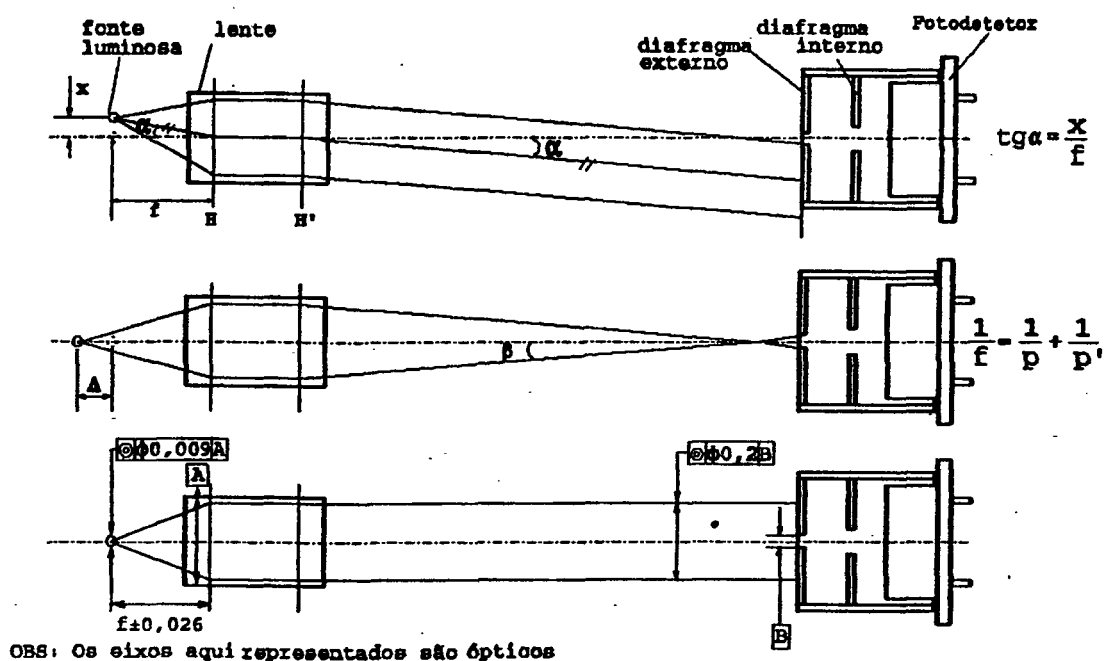


Figura 3.11 - Desvios máximos admissíveis da tolerância de forma de concentricidade e de localização de posição

3.6.2 - Ajustes dos Componentes

Para que se consiga respeitar as tolerâncias acima especificadas e para que a usinagem não seja muito crítica, são necessários cinco graus de liberdade para a montagem dos componentes na armação mecânica (figura 3.12). Quatro dos quais sobre o diodo laser, para fazer coincidir o eixo óptico com o eixo que passa pelo centro dos diafragmas e fotodetector, sendo estes previamente montados. E um sobre a lente, para ajuste do ponto de focalização - colimação.

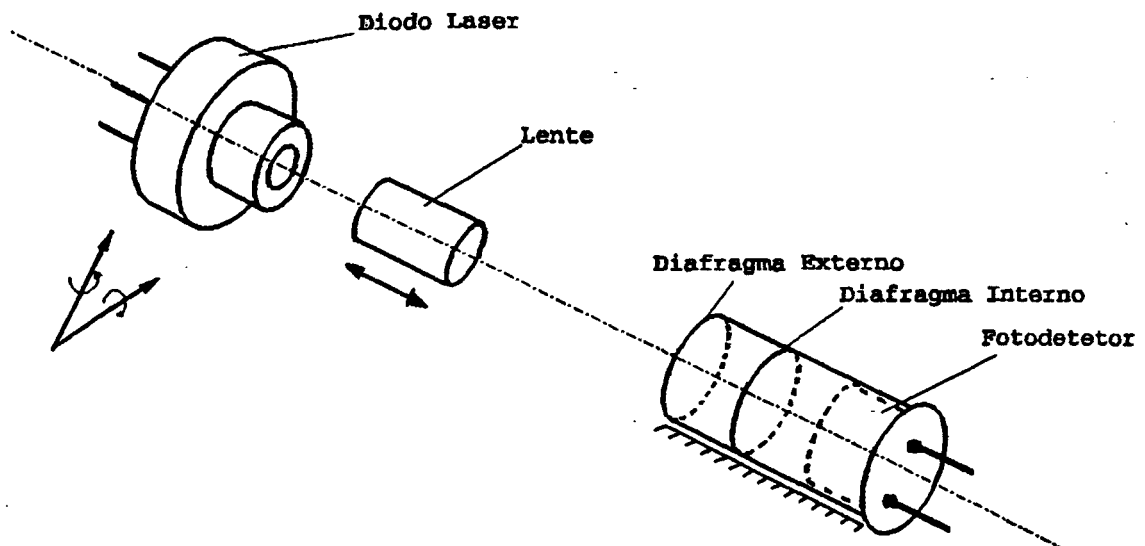


Figura 3.12 - Graus de liberdade necessários para o alinhamento do sistema óptico

3.6.3 - Projeto do Arco

Na figura 3.13 tem-se um esboço do arco, ele está embasado nos quesitos de: rigidez, tolerâncias, possibilidade de ajustes, dissipação de calor dos componentes optoeletrônicos a ele acoplados, e as formas das peças a serem apalpadas. Para sua montagem são utilizadas técnicas de montagem, ajuste e colagem.

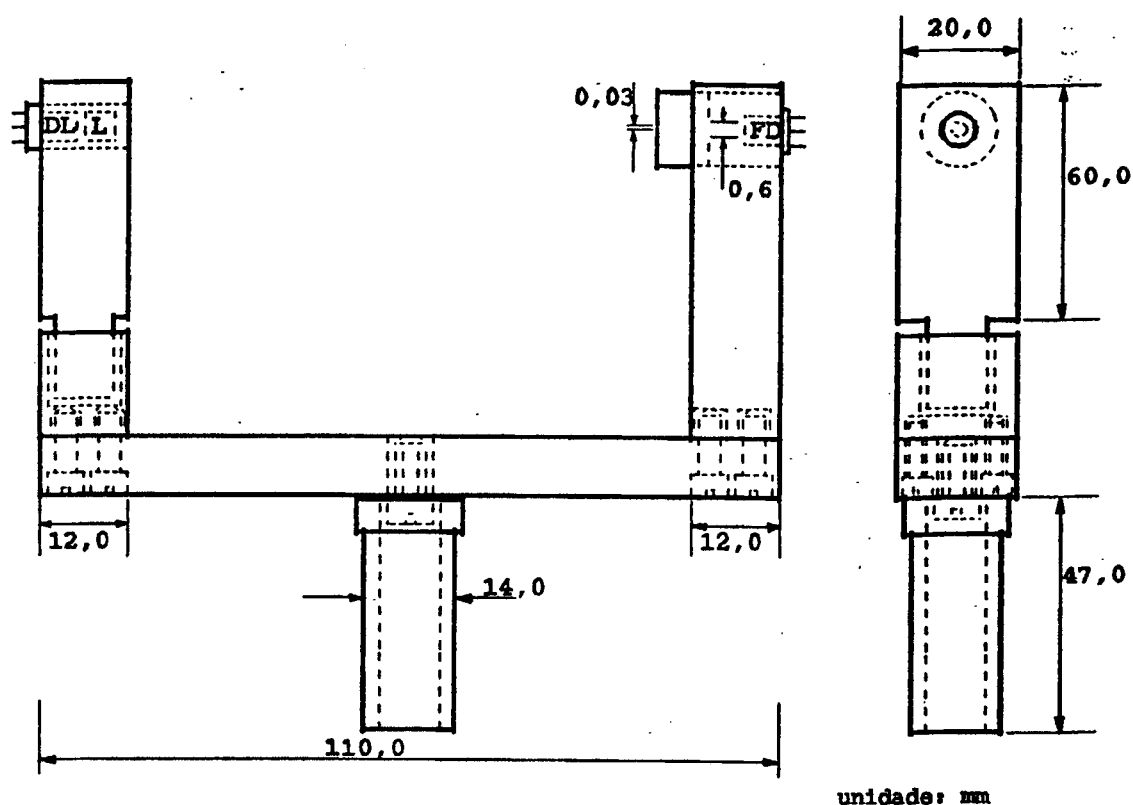


Figura 3.13 - Projeto mecânico do apalpador optoeletrônico

3.7 - ACOPLAMENTO DO APALPADOR OPTOELETRÔNICO A MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Na figura 3.14 tem-se um diagrama de blocos para a comunicação do apalpador com uma CMM sem CNC (*Computer Numerical Control*). Cabe elucidar alguns blocos:

- o microcomputador pode ser um IBM PC XT/AT ou compatível, para controle, armazenamento e visualização dos dados;
- a placa paralela é utilizada na recepção do *trigger* proveniente da unidade de tratamento de sinais do apalpador;

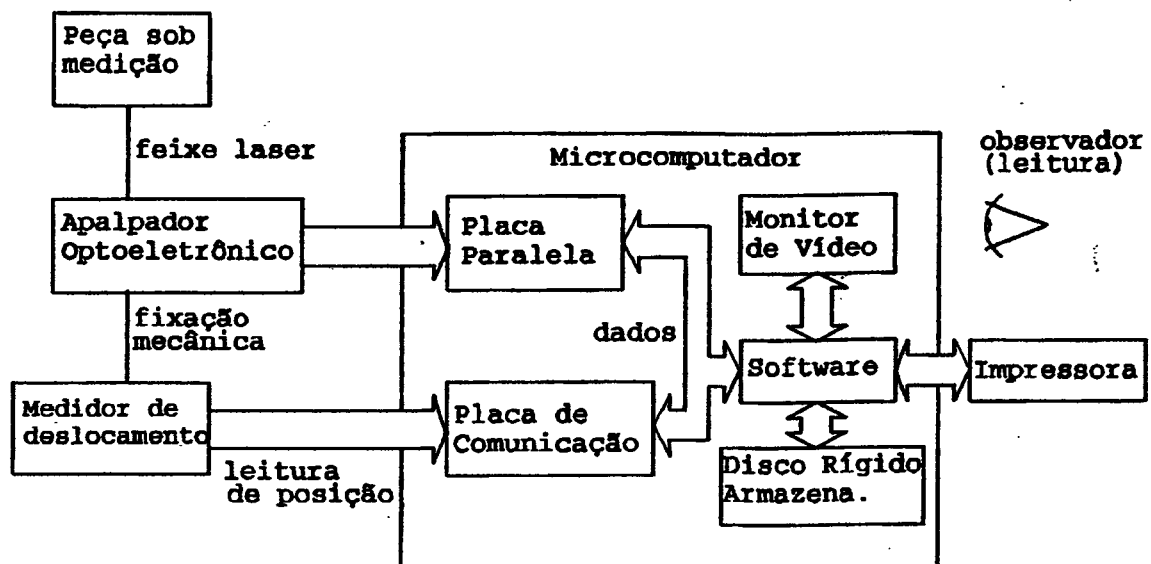


Figura 3.14 - Diagrama de blocos das interfaces do sistema

- placa de comunicação da CMM, para recepção dos dados;
- o *software* aguardar o *trigger* do apalpador, recebe, faz a aquisição das coordenadas do ponto via placa de comunicação, processa os dados, apresenta na tela e providencia o armazenamento dos mesmos.

Cabe ressaltar que deve existir flexibilidade quanto a configuração, pois o apalpador deve se ajustar a cada tipo de máquina de medir por coordenadas.

3.8 - ANÁLISE DE ERROS NA CADEIA DE MEDIÇÃO

A seguir será feita uma análise teórica de erros dos elementos mais críticos na cadeia de medição. Não serão considerados erros provocados por perturbações ambientais, já que, são de pouca influência e, na maioria das vezes, a utilização do apaipador dá-se em laboratórios com condições climáticas controladas

3.8.1 - Erros Sistemáticos

Os principais erros sistemáticos do apaipador são provocados pela difração e reflexão na superfície da peça. Fenômenos já apresentados no item 3.2.3.

Como somente a reflexão é significativa, no que diz respeito aos erros sistemáticos, pode-se adotar uma das seguintes estratégias para sua minimização:

- criar curvas de erros sistemáticos segundo o diâmetro, qualidade superficial e material presentes na peça, para uma compensação via *software*;
- diminuir o diâmetro do segundo diafragma, no sentido de diminuir a passagem de raios não paralelos ao eixo óptico do sistema, que é o caso dos raios refletidos.

3.8.2 - Erros Aleatórios

Para fazer a análise dos erros aleatórios, toma-se como partida o fato de que a grandeza a ser controlada é o sinal equivalente ao diâmetro do feixe laser. Pois, quanto melhor controlada suas oscilações, melhor será a determinação do ponto de contato deste com a peça.

Tendo presente este fato, deve-se determinar as oscilações do sinal equivalente ao feixe para poder determinar os erros do apalpador.

Os erros serão referidos ao final da parte analógica da unidade de tratamento de sinal, por este módulo também provocar erros e por ser a unidade de tratamento de sinal o estágio final do apalpador. Os erros da parte digital desta não serão considerados por serem desprezíveis.

A seguir será quantificado, em termos de ruído de tensão, para em seguida fazer a conversão para micrometros, os principais erros aleatórios encontrados no apalpador:

- Instabilidade de potência do diodo laser: $\pm 0.2\%$ - este valor foi obtido pela medição após a estabilização térmica do mesmo ($\approx 30\text{min}$). Transpondo-se este dado para a saída ($10V_{p-p}$) tem-se um valor de oscilação da tensão igual a $20mV_{p-p}$.
- corrente de escuro no fotodetector: $0.3nA$ /40/, que, multiplicando-se pelo ganho dos dois estágios de amplificação e pelo fator 6.6 - converte um valor rms em valor pico-a-pico (p-p) /49/ - fornece o valor de oscilação da tensão, $35mV_{p-p}$.

- ruído do amplificador operacional, pré-amplificador, e do fotodetector (sem considerar a corrente de escuro): $10\mu\text{V}_{\text{rms}}$ na saída do pré-amplificador, convertendo este valor para a saída do amplificador tem-se uma oscilação na tensão de $14\text{mV}_{\text{p-p}}$.
- ruído do amplificador operacional do segundo estágio: $67\mu\text{V}_{\text{p-p}}$ referido a entrada /50/, que, multiplicando pelo ganho de seu estágio, fornece o valor de oscilação da tensão, $15\text{mV}_{\text{p-p}}$.
- ruído do amplificador operacional do filtro: $0.2\text{mV}_{\text{p-p}}$, que já é o valor de oscilação da tensão de saída.
- ruído do regulador de tensão: $0.6\text{mV}_{\text{p-p}}$, idem comentário acima.

Por se tratar de erros não relacionados, o erro provável será a soma quadrática dos vários erros, logo, valor final = $45\text{mV}_{\text{p-p}}$ de oscilação do sinal analógico do palpador. Isto com uma certa margem de segurança, já que a maioria dos dados obtidos do catálogo são para o caso geral e poderiam ser minimizados para as condições específicas, via alguns cálculos.

Em uma breve análise do valor $45\text{mV}_{\text{p-p}}$, percebe-se que as principais fontes de erro são: a corrente de escuro do fotodetector, o diodo laser, o amplificador operacional do segundo estágio e, por último, o amplificador operacional do pré-amplificador.. juntamente com o fotodetector. Para uma minimização deste valor, o primeiro passo a ser tomado seria "atacar" o fotodetector, por exemplo, utilizando-se um de operação fotovoltaica (sem corrente de escuro) como é a proposição ideal. Em seguida poder-se-ia melhorar as características de ruído dos outros componentes, pela troca destes por outros de melhores características.

Para converter este ruído em incerteza de medição, faz-se a seguinte análise: o diâmetro efetivo do feixe laser é $30\mu\text{m}$ é proporcional a potência luminosa incidente no fotodetector e, por conseguinte, equivalente aos $10V_{p-p}$ na saída da parte analógica da unidade de tratamento de sinal do apalpador. Considerando que a incerteza de medição está diretamente relacionada com a capacidade de resolução desses $10V_{p-p}$, tem-se, por uma regra de três, uma dispersão da medição na ordem de $\pm 0.1\mu\text{m}$.

4 - RECURSOS PARA ENSAIO DO DESEMPENHO METROLÓGICO DO PROTÓTIPO FUNCIONAL

Para proceder a calibração de um apalpador seria necessário ter uma máquina de medir por coordenadas (CMM) e um padrão corporificado com erros máximos iguais ou inferiores a 1/10 dos erros estimados para o apalpador, para que todos os erros identificados durante os ensaios pudessem ser atribuídos ao apalpador.

Sabe-se que na prática, esta condição é difícil de ser obtida. Numa aproximação desta condição, montou-se uma bancada de ensaios para calibração direta do apalpador optoeletrônico, onde a grandeza padrão constitui-se dos padrões corporificados, o sistema de medição a calibrar constitui-se do transdutor (apalpador), sistema de medição de posição (baseado numa escala eletroóptica) e uma unidade de indicação e análise comparativa (microcomputador).

Os erros presentes nos módulos, com exceção do apalpador, são conhecidos e, portanto, ao final dos ensaios, é possível determinar-se os erros do apalpador.

Na figura 4.1 tem-se uma visão geral da bancada para ensaios metrológicos do protótipo e na figura 4.2 a distribuição dos elementos funcionais desta. O intuito desta bancada é simular o funcionamento de uma CMM e dar suporte, em todas as configurações necessárias, a execução dos diversos ensaios a serem feitos com o apalpador.

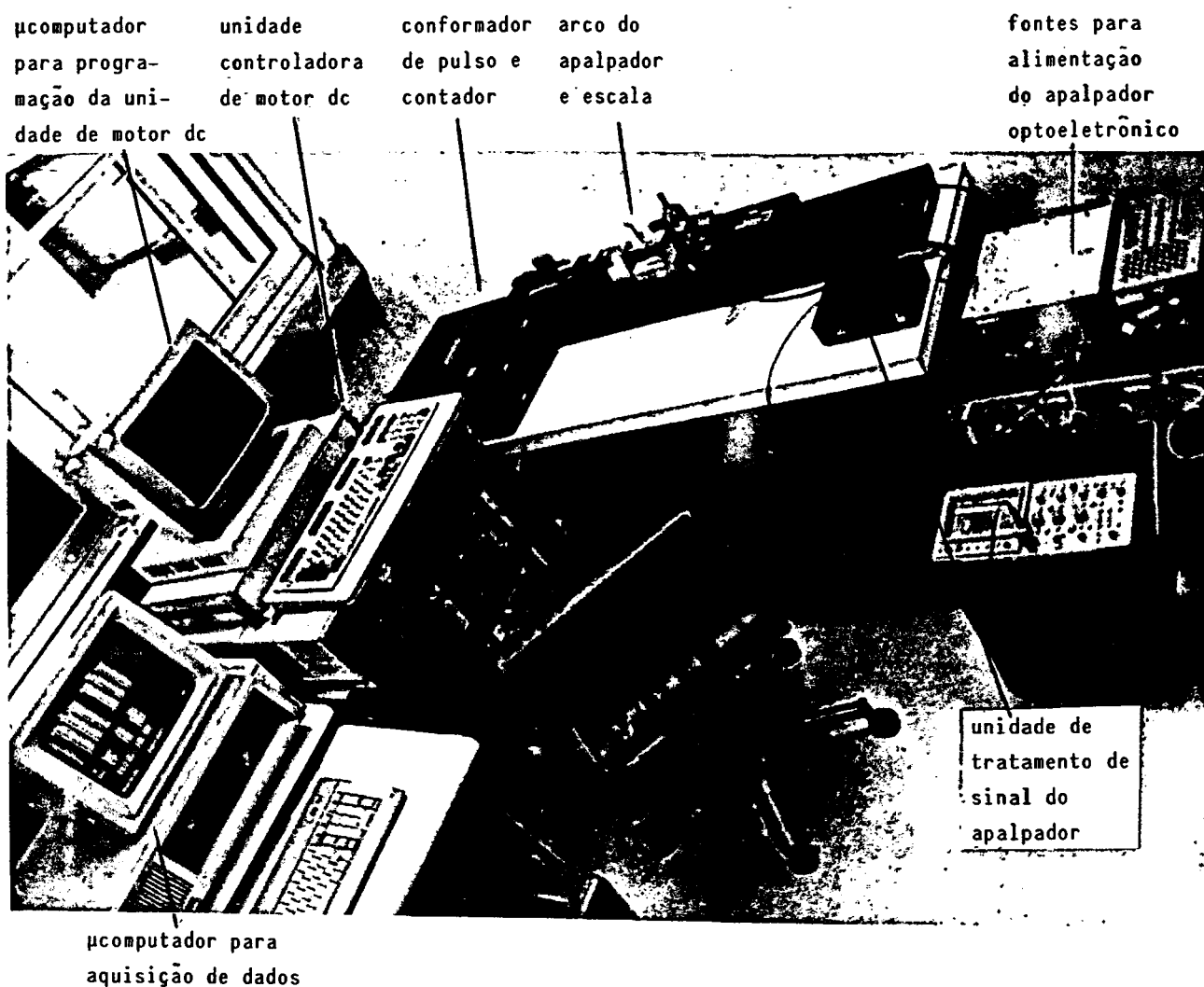


Figura 4.1 - Visão geral da bancada de ensaios

Esta bancada simula uma CMM no que diz respeito:

- ao posicionamento, sistema para posicionamento/microdeslocamentos automatizado;
- a automação, sistema para aquisição e processamento de dados automatizado;
- a medição, sistema de medição a calibrar.

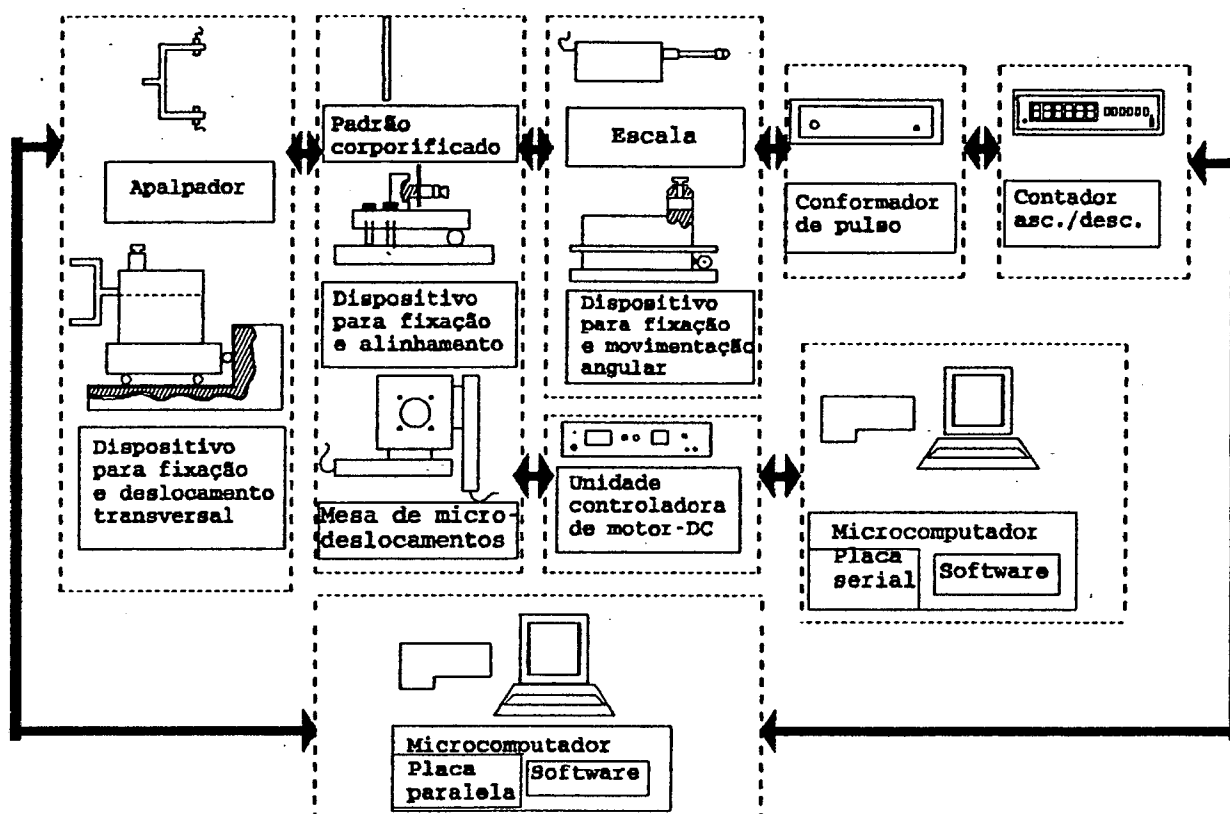


Figura 4.2 - Elementos funcionais da bancada para ensaios metrológicos do apalpador

4.1 - INSTRUMENTOS PARA A BANCADA DE ENSAIOS

A seguir será caracterizado e detalhado cada um dos componentes da bancada de ensaios da figura 4.2; enfocando suas características metrológicas. Esses componentes são necessários para realização dos ensaios, onde a incerteza de medição do apalpador é desconhecida e as dos diversos componentes da bancada de ensaios conhecidas, sendo assim possível a determinação da incerteza do apalpador.

4.1.1 - Padrões corporificados

Idealmente dever-se-ia proceder a medição de todo tipo de grandeza e todas as dimensões possíveis à qual o apalpador se presta, para analisar toda a faixa de operação. Por limitação de padrões de diferentes formas e dimensões os ensaios serão restritos aos padrões disponíveis e os resultados serão extrapolados, na medida do possível, para os demais casos.

Os padrões corporificados serão utilizados como grandeza padrão nas diversas medições. Para isso, serão utilizados arames padrão com tolerâncias conhecidas e/ou previamente calibrados. Os padrões corporificados utilizados neste trabalho tem como grandeza a medir um diâmetro, já que são mais facilmente alinháveis junto a bancada de ensaios. Suas características estão descritas abaixo.

a) Jogo de arames padrão

São arames especificados basicamente para calibração de roscas, pelo método dos três arames. Serão aqui utilizados por oferecerem uma baixa incerteza em seu diâmetro e por serem, como já foi dito, facilmente alinháveis junto a bancada de ensaios.

Características /51/:

- quantidade de arames com diferentes diâmetros: 21;
- diâmetros nominais: 0.17 - 6.35mm;
- tolerância do diâmetro: $\pm 0.5\mu\text{m}$.

b) Pino

Devido aos arames padrão terem diâmetros limitados é utilizado um pino padrão para ampliar a faixa de operação, o ideal seria utilizar outras faixas mais. Características metrológicas:

- qualidade superficial: lapidado;
- diâmetro: $9.9997 \pm 0.0004\text{mm}$.

4.1.2 - Dispositivos para fixação e alinhamento dos padrões corporificados

Para seguir o princípio de Abbe, deve-se atender a certos critérios de alinhamento entre os padrões corporificados e o sistema de medição de posição. Na figura 4.3 é apresentado um esboço do projeto do dispositivo responsável pelo alinhamento - nas direções de rolamento e tombamento - entre o padrão corporificado e a escala. Cabe ressaltar que na direção de tombamento o ajuste não é crítico, pois os padrões tem bom acabamento superficial e os deslocamentos nesta direção não são significativamente sentidos pelo apalpador ou sistema de medição de posição. O ajuste na direção de guinamento dar-se-á com o dispositivo para fixação e movimentação angular da escala do sistema de medição de posição.

São utilizados dois parafusos para obter os ajustes necessários. Na figura 4.4 tem-se um detalhe da montagem mecânica deste dispositivo, que apresenta um arame padrão fixo ao mesmo. Na figura 4.5 tem-se uma visão destes dispositivos e de todos os outros de fixação, alinhamento e ajustagem, utilizados na bancada de ensaios.

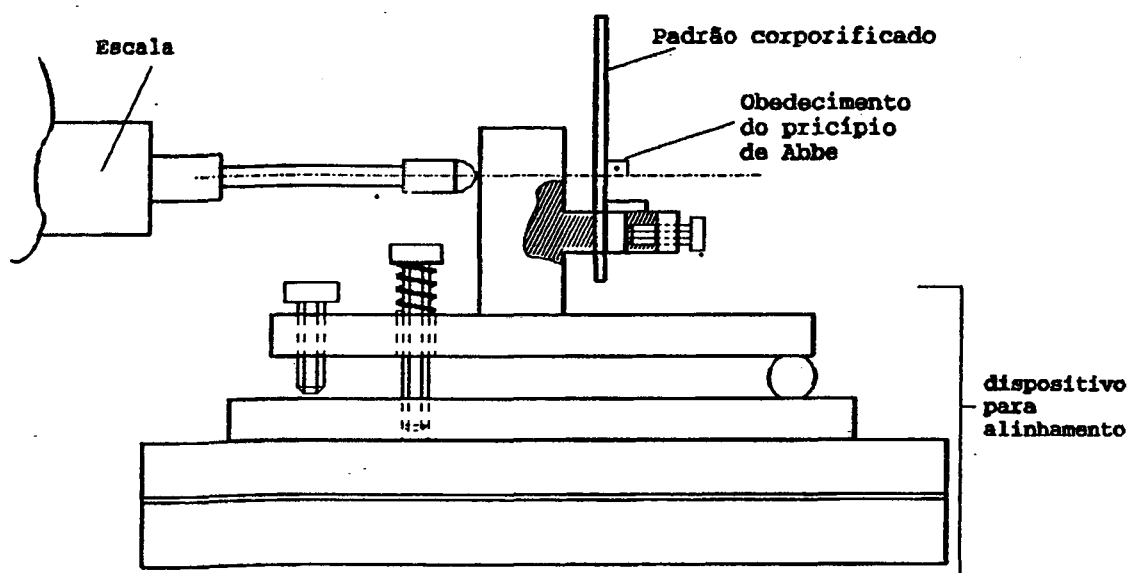


Figura 4.3 - Dispositivo para fixação e alinhamento dos padrões corporificados

Cabe ressaltar que o alinhamento é feito através de ajustes, durante a realização de um ensaio. Por exemplo: para eliminar o desalinhamento por rolamento do padrão, coloca-se o sistema em funcionamento e procede-se algumas leituras da grandeza. A seguir, ajusta-se o dispositivo até obter o ponto de mínimo e, conseqüentemente, o valor da grandeza em questão.

4.1.3 - Mesa de Microdeslocamentos

A mesa de microdeslocamentos está rigidamente acoplada sob o dispositivo de fixação e alinhamento dos padrões corporificados.

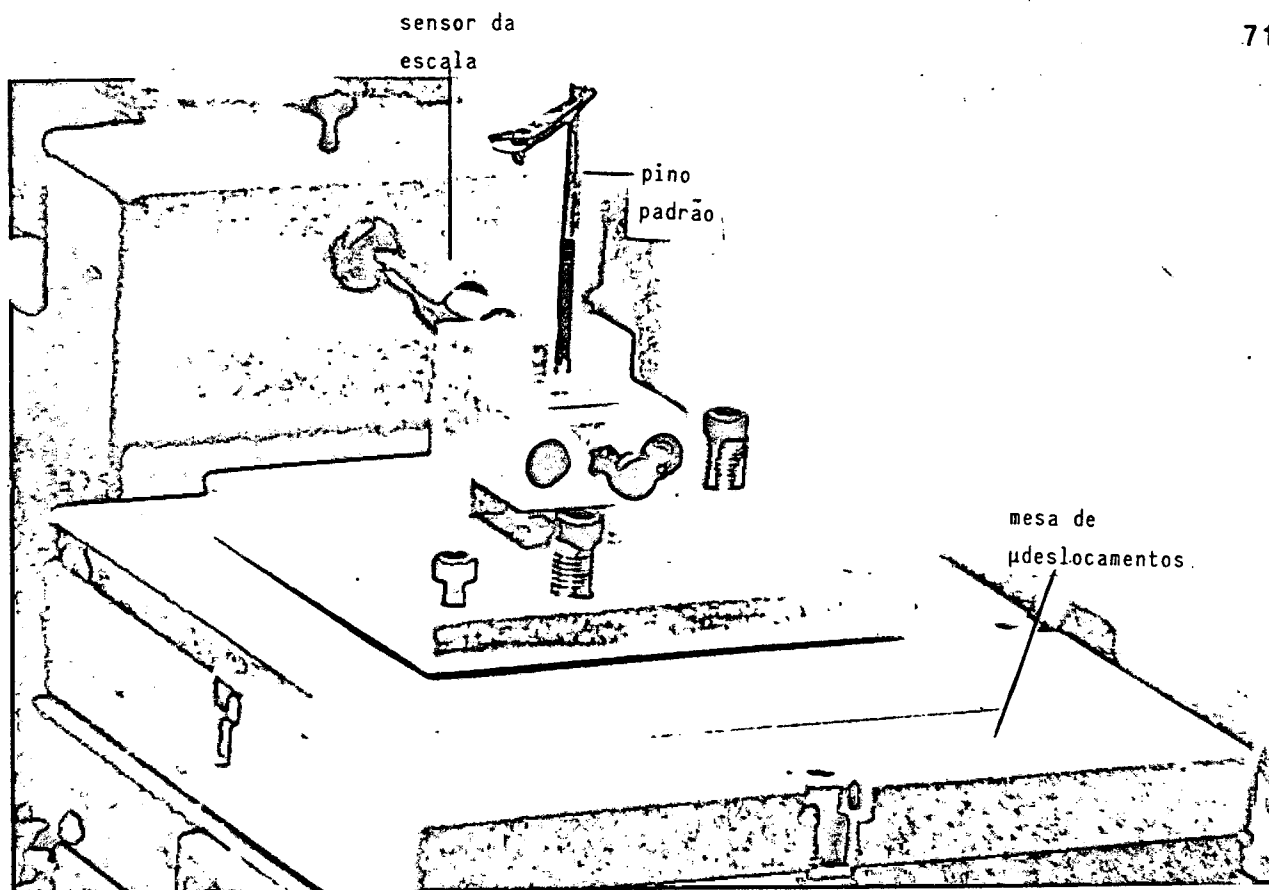


Figura 4.4 - Detalhe do dispositivo para fixação e alinhamento dos padrões corporificados

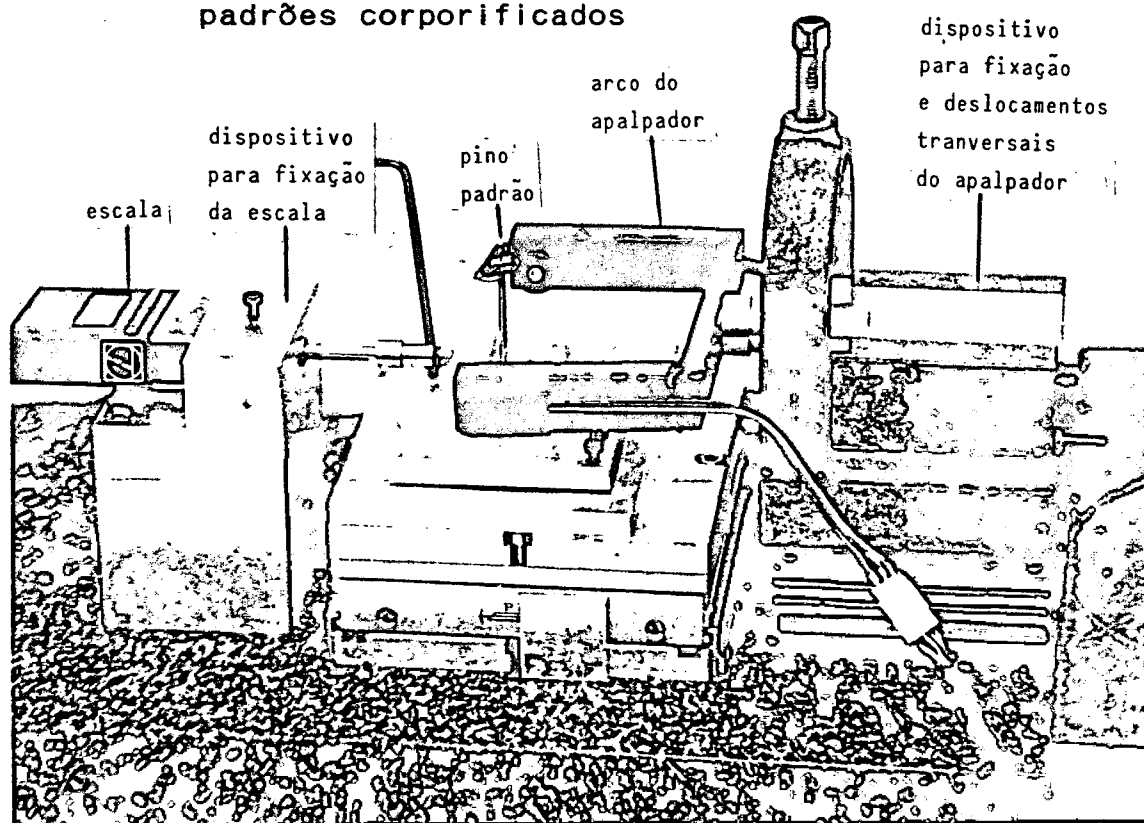


Figura 4.5 - Detalhe da bancada para ensaios metroológicos do apalpador

Tem por função simular o funcionamento do CNC (*Computer Numerical Control*) da máquina de medir por coordenadas, ou seja, provocar o movimento relativo entre o padrão corporificado e o sistema de medição de posição. Com isso é possível a passagem do padrão corporificado através do feixe laser, com uma velocidade constante, reversível e de forma repetitiva. O controle desta mesa é feito por um *software* específico executado em um microcomputador, que permite a determinação do sentido de deslocamento da mesa, a variação de sua velocidade, paradas em determinadas posições, etc.

Características e componentes:

- movimento controlável: velocidades ($\leq 0.7\text{mm/s}$) e acelerações;
- Torque do motor DC;
- motor de corrente contínua;
- unidade controladora de motor DC programável.

A velocidade é uma limitação, idealmente deveria tender ao infinito. Nas atuais CMM's com apalpadores rígidos, a velocidade está em torno de 5mm/s , o que está ainda muito além dos 0.7mm/s permitidos pela mesa de microdeslocamentos. A análise feita para velocidades abaixo de 0.7mm/s pode ser extrapolada para valores maiores, sem incorrer em erros significativos.

4.1.4 – Escala e Dispositivo para Fixação e Movimentação Angular

O sistema de medição de posição é o componente chave na bancada de ensaios, visto que seus erros afetarão diretamente nos resultados destes. Por isso, optou-se por um sistema de medição de posição em boas condições e com características abaixo descritas.

O sistema de medição de posição é composto por uma escala eletroóptica (motivo pelo qual o sistema de medição de posição é somente denominado escala ao longo do texto), um conformador de pulso e um contador ascendente/descendente. O conformador de pulso e o contador abrigam a unidade de tratamento de sinais, indicador e *interface* com microcomputador. A figura 4.6 mostra a sua curva de calibração. Características /52,53/:

- velocidade de medição máxima: 0.3m/s;
- incerteza de medição: $\pm 0.6\mu\text{m}$;
- incerteza de medição com compensação de erros sistemáticos: $\pm 0.3\mu\text{m}$;
- resolução = $0.1\mu\text{m}$;
- faixa de operação: 30mm.

Com o valor da velocidade pode-se determinar um tempo de resposta de aproximadamente 0.3 μs . Um valor bastante bom para as experimentações a serem feitas, quando comparadas a velocidade da mesa de microdeslocamentos.

O dispositivo para fixação e movimentação angular da escala é composto por uma mesa de movimentação angular comercial. Objetiva o alinhamento - na direção de guinamento - entre o padrão corporificado e a escala. O procedimento para este alinhamento é o mesmo descrito no final do item 4.1.2.

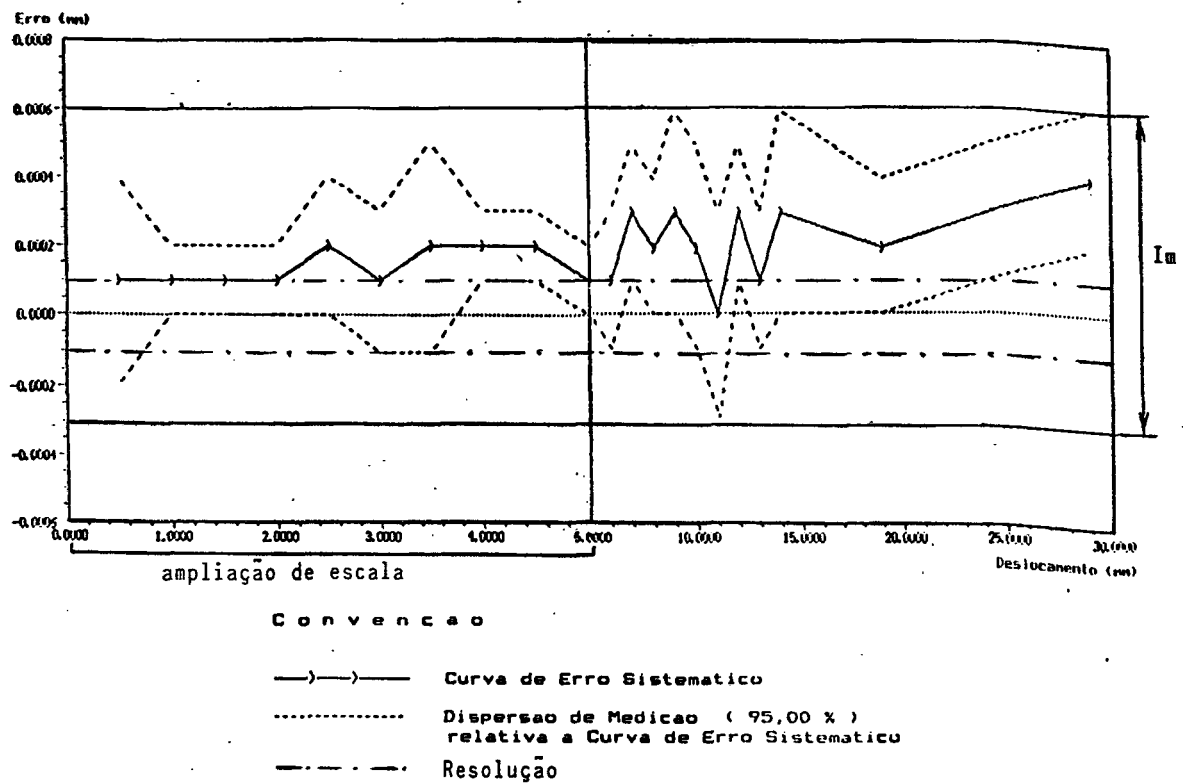


Figura 4.6 - Curva de calibração da escala /52/

4.1.5 - Dispositivo para Fixação e Deslocamentos Transversais do Apalpador

Este dispositivo permite o movimento relativo entre o apalpador e o padrão corporificado, na direção de propagação do feixe laser. Esta movimentação é necessária para execução do ensaio de posicionamento ao longo do feixe, que prevê a movimentação relativa entre o apalpador e o padrão corporificado - discutido no próximo capítulo.

O dispositivo proporciona um apoio isoestático utilizando três esferas de aço sobre uma plataforma de granito, e apoio lateral com

duas esferas de aço numa régua também de granito. Isto para ter uma boa sustentação e uma trajetória bastante linear ao proceder-se este deslocamento.

4.2 - AUTOMAÇÃO DA BANCADA PARA ENSAIOS

Devido ao grande volume de leituras a serem realizadas, a necessidade da maior confiabilidade possível para o sistema e de uma simulação bastante realística da CMM, torna necessária a automação da bancada para ensaios. Além do que, a automação facilita bastante o uso da bancada. A seguir serão descritas as soluções adotadas para esta automação.

4.2.1 - Hardware

Para proceder a automação da medição fez-se uso de dois microcomputadores do tipo IBM PC. Um, com *interface* serial, para controle da mesa de microdeslocamentos e o outro para aquisição, manipulação e armazenamento dos dados provenientes da escala. A *interface* entre ambos é feita via placa de comunicação paralela. É via esta placa que chega o *trigger* - gerado pelo apalpador - ao microcomputador (fig. 4.1 e 4.2).

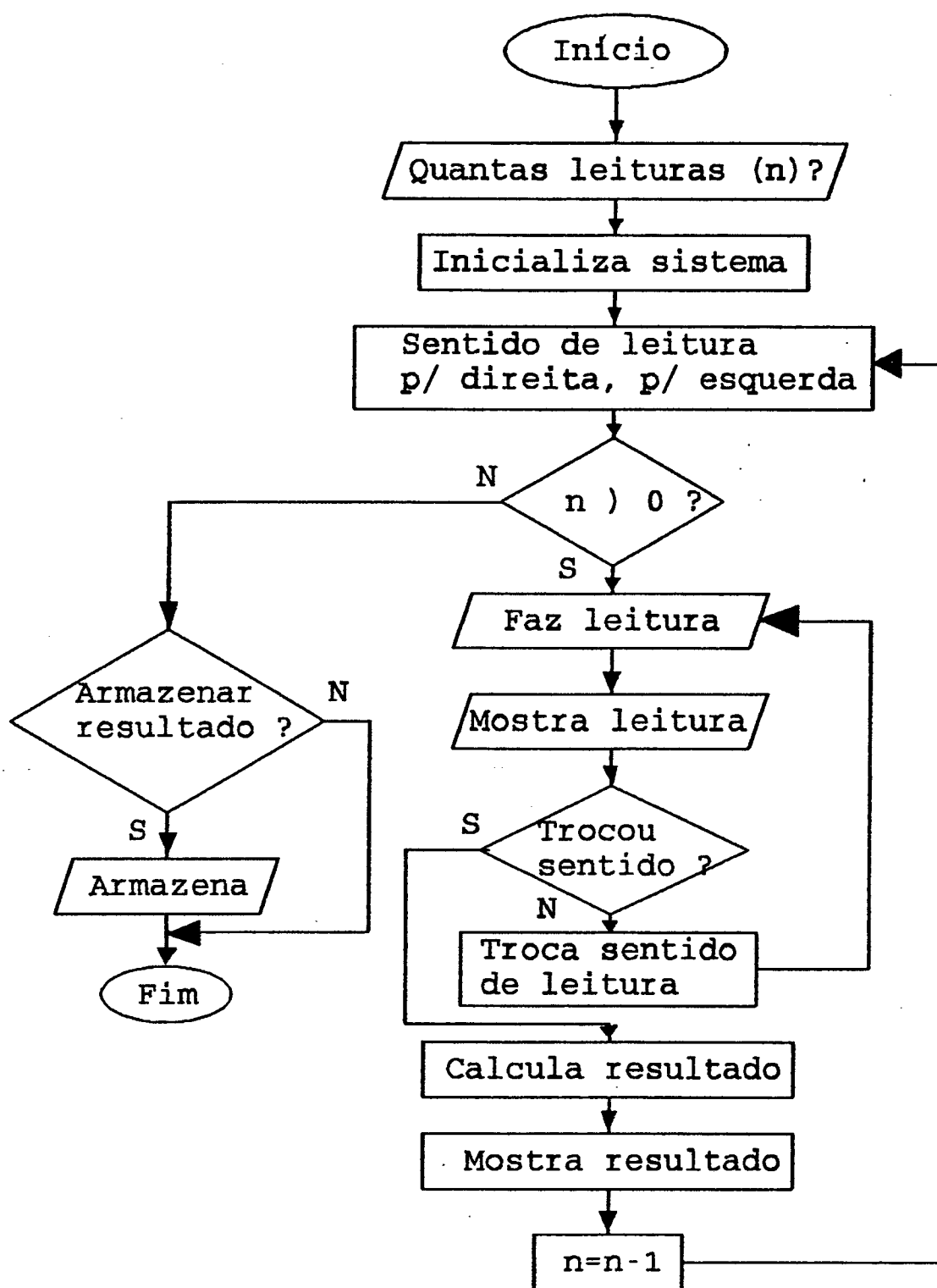


Figura 4.7 - Fluxograma do software para aquisição de dados

4.2.2 - Software

Na figura 4.7 tem-se um fluxograma básico do *software* desenvolvido para aquisição, armazenamento e processamento dos dados. As rotinas de leitura do *trigger* e dos dados provenientes da escala foram desenvolvidas na linguagem de programação Assembler, para propiciar alta velocidade de aquisição (na ordem de microsegundos), já que a medição é dinâmica. Já as rotinas de *interface* homem/máquina foram desenvolvidas na linguagem de programação Pascal, pois não têm restrições quanto a velocidade. Na figura 4.8 tem-se um exemplo de aquisição, apresentação e processamento de dados pelo *software*.

Cabe destacar a rotina de cálculos, onde os *triggers* - Ida Entrada, Ida Saída, Volta Entrada e Volta Saída - são aquisicionados independentemente de seu valor. No caso de um valor muito fora da média - valor determinado pelo operador - o programa avisa, colocando uma mensagem de *trigger* errado (TE) ao lado deste valor, mas ainda assim o inclui nos cálculos. Para o caso dos *triggers* o cálculo se resume a determinar a média aritmética e o desvio padrão, que são apresentados na tela do programa (fig. 4.8).

Ao lado de cada par de leituras aparece o respectivo diâmetro (fig. 4.8). O resultado da medição é calculado pela média dos diâmetros (resultado base) e uma incerteza do resultado - calculada pela composição da dispersão da medição dos diâmetros e da incerteza de medição da escala.

n	Ida			Volta		
	Entrada	Saída	Diâmetro	Entrada	Saída	Diâmetro
1	2.5576	4.6070	2.0494	4.5770	2.5271	2.0499
2	2.5570	4.6069	2.0499	4.5771	2.5269	2.0502
3	2.5573	4.6070	2.0497	4.5767	2.5271	2.0496
4	2.5570	4.6072	2.0502	4.5774	2.5271	2.0503
5	2.5571	4.6070	2.0499	4.5766	2.5269	2.0497
6	2.5573	4.6072	2.0499	4.5765	2.5271	2.0494
7	2.5571	4.6072	2.0501	4.5770	2.5272	2.0498
8	2.5571	4.6070	2.0499	4.5770	2.5273	2.0497
9	2.5573	4.6070	2.0497	4.5768	2.5271	2.0497
10	2.5573	4.6071	2.0498			
		MÉDIA	DESVIO			
Ida	: Entrada	2.5572	0.000194			
	: Saída	4.6071	0.000113			
Volta	: Entrada	4.5769	0.000278			
	: Saída	2.5271	0.000127			
	Diâmetro Ida	=	2.0499 ± 0.0003			
	Diâmetro Volta	=	2.0498 ± 0.0003			
Fazendo leituras.			Esperando chegar a 6			_7.0769

Figura 4.8 - Exemplo de apresentação/aquisição de dados do software

5 - ENSAIOS E RESULTADOS

Para uma avaliação experimental do protótipo, quanto as suas características metrológicas, realizaram-se diversos ensaios e testes. Maior enfoque foi dado aos ensaios metrológicos, que permitiu um confronto direto de seus resultados com os obtidos na análise teórica dos mesmos e uma efetiva quantificação de seus valores.

Durante a realização dos ensaios foram observados os seguintes quesitos: em todos os ensaios realizou-se um rigoroso alinhamento na bancada de ensaios sempre que houve a troca de algum dispositivo mecânico, como por exemplo: os padrões corporificados; a temperatura ambiente permaneceu dentro da especificação de $20.0 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$.

Como observação inicial, cabe ressaltar que em quase todos os resultados dos ensaios percebe-se um erro sistemático, a eliminação deste erro não foi uma preocupação, já que o mesmo não prejudica as análises pretendidas. Cabe dizer que este erro pode ser facilmente eliminado pelo ajuste do apalpador.

Outra observação é que o sistema realiza medições nos dois sentidos de movimentação da mesa de microdeslocamentos/padrões

corporificados, denominados como ida ($x \rightarrow$) e volta ($x \leftarrow$). Ainda serão retratados os termos entrada e saída designando a entrada e saída do padrão corporificado no feixe laser, respectivamente.

5.1 - ENSAIO DO TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO

Este ensaio objetiva o levantamento do tempo necessário para o apalpador entrar em regime.

Com o intuito do levantamento do tempo de estabilização térmica somente do apalpador, foi posta em funcionamento por 30min, toda a bancada de ensaios, com exceção do apalpador. Após o que, ligou-se o apalpador e executou-se 50 leituras nos sentidos $x \rightarrow$ e $x \leftarrow$, num tempo aproximado de 25min. O padrão corporificado utilizado foi um arame padrão de 2.05mm de diâmetro nominal.

Na figura 5.1 observar-se a evolução deste ensaio. Na figura 5.1.a tem-se o erro do diâmetro, calculado pela diferença entre as suas leituras, com o tempo. Na figura 5.1.b-c tem-se a variação de suas respectivas leituras (posição dos *triggers*) - as leituras $x \rightarrow$ entrada e $x \leftarrow$ saída foram acrescidos de uma constante com valor 0.03mm, para que ficassem na mesma faixa e pudessem ser apresentados no mesmo gráfico.

O apalpador entra em regime em aproximadamente 10min (fig.5.1), ou seja, o tempo de estabilização térmica do apalpador. A razão de variação do diâmetro com o tempo, durante a estabilização, é em torno de $0.2\mu\text{m}/\text{min}$. A razão de tal variação é devida a

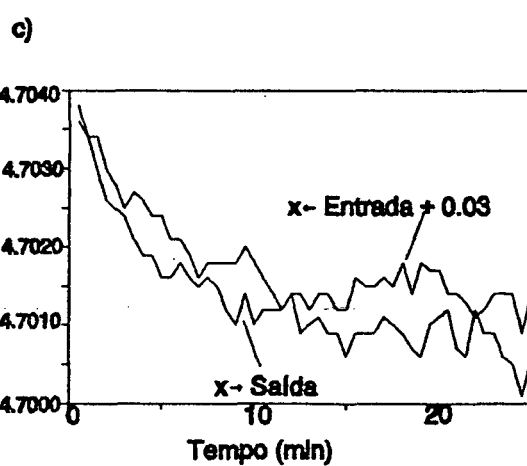
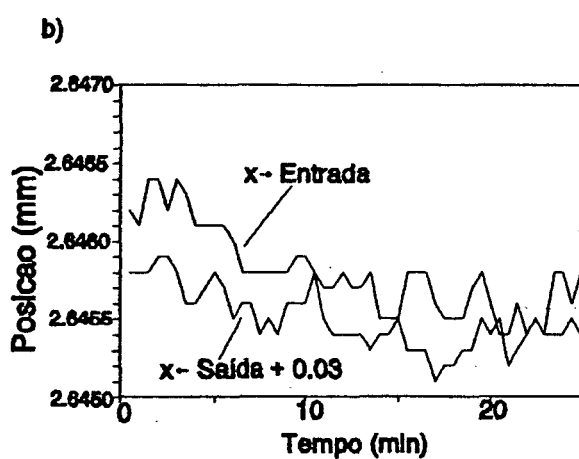
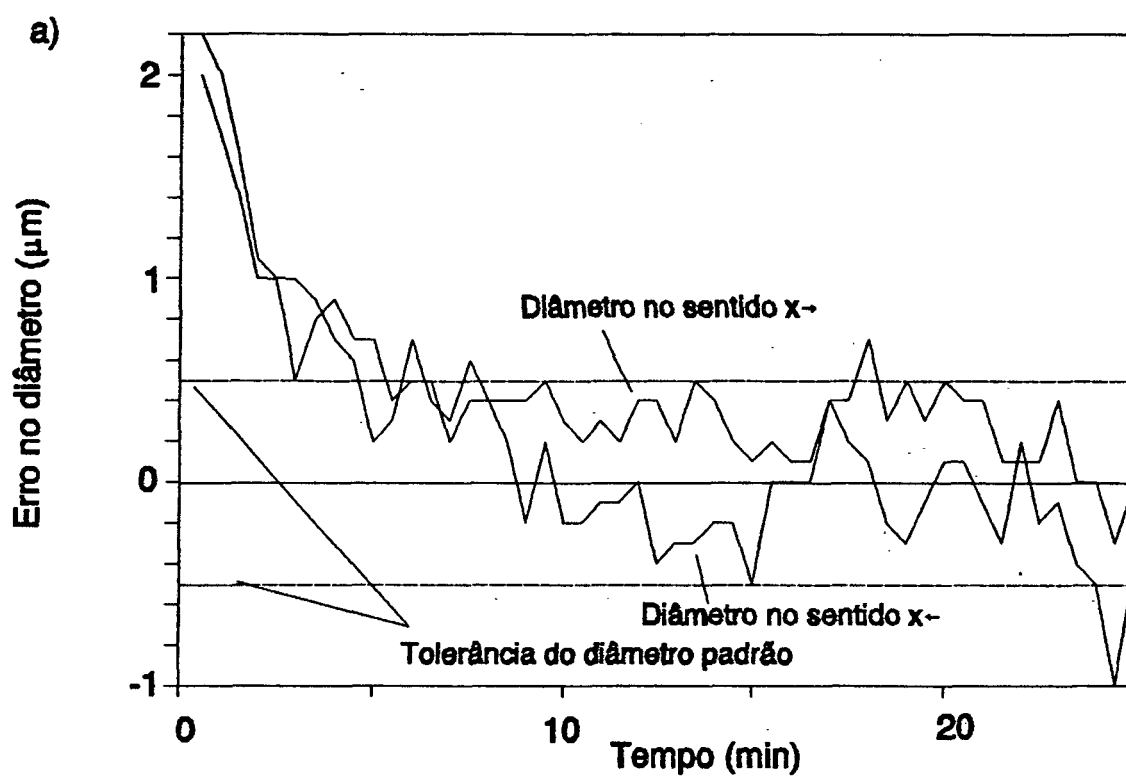


Figura 5.1 - Ensaio de estabilização térmica do apalpador

estabilização térmica dos diversos componentes eletrônicos; principalmente do diodo laser que sofre grande influência - quanto a sua potência luminosa - com a variação de temperatura.

5.2 - ENSAIO DE REPETIBILIDADE E HISTERESE

Este ensaio objetiva o levantamento da repetibilidade e histerese do sistema como um todo. Estas características podem ser analisadas quanto aos *triggers* e quanto a medição diferencial, no caso medição de diâmetro.

Para a realização deste ensaio, partiu-se de uma prévia estabilização térmica da bancada. Foi utilizado como padrão corporificado, um arame padrão de 2.05mm de diâmetro nominal, velocidade de deslocamento do padrão corporificado de 0.6mm/s e executou-se 50 leituras nos sentidos $x \rightarrow$ e $x \leftarrow$.

No gráfico da figura 5.2.a tem-se uma noção da repetibilidade do sistema. No eixo das ordenadas estão os diâmetros medidos subtraídos da média. Das leituras que deram origem aquela figura, pode-se inferir que os valores extremos são $\pm 0.6\mu\text{m}$ e $\pm 0.5\mu\text{m}$ para os diâmetros nos sentidos $x \rightarrow$ e $x \leftarrow$, respectivamente, e ainda que os diâmetros nos sentidos $x \rightarrow$ e $x \leftarrow$ são, respectivamente: $2.0551 \pm 0.0005\text{mm}$ e $2.0549 \pm 0.0005\text{mm}$, onde a incerteza do resultado é dada pela dispersão da medição para noventa e cinco por cento dos casos - DM(95%).

A figura 5.2.b-c mostra o comportamento, em termos de histerese, das leituras ao longo das medições. Dela pode-se inferir que a histerese, respeitando-se as condições iniciais, é de aproximadamente de $30\mu\text{m}$, para o caso da posição dos *triggers*. A causa mais provável desta histerese é atraso de tempo decorrido entre a obstrução/desobstrução pela metade do feixe e a efetivação da leitura, pelo microcomputador, do valor indicado pela escala. Acredita-se (por não dispor-se do valor correto) que a maior fonte de atrasos é a escala, já que o valor $0.3\mu\text{s}$ é do equipamento original, sendo que este foi alterado para proceder-se a aquisição automática. Finalmente, dos resultados da figura 5.2.a percebe-se que praticamente não existe histerese no caso da medição diferencial de diâmetros. Isto é salutar, pois a grande maioria de medições em sua essência são medições diferenciais.

5.3 - ENSAIO DE VARIAÇÃO DOS DIÂMETROS MEDIDOS COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

Objetiva estudar o comportamento do sistema como um todo, mediante a variação da velocidade de apalpação. Como condição ideal dever-se-ia ter uma escala e *software* com atrasos de tempo na ordem de $1/10$ do atraso de tempo do apalpador. Cabe destacar que esta condição não foi possível de ser atingida e também que não é possível separar as parcelas de atraso de tempo do apalpador, da escala e do microcomputador - aquisição dos dados - e por isso, os resultados obtidos vão conter erros devido ao atraso de tempo não só do apalpador.

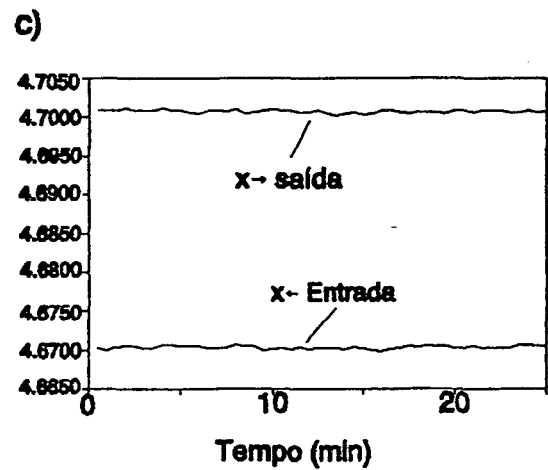
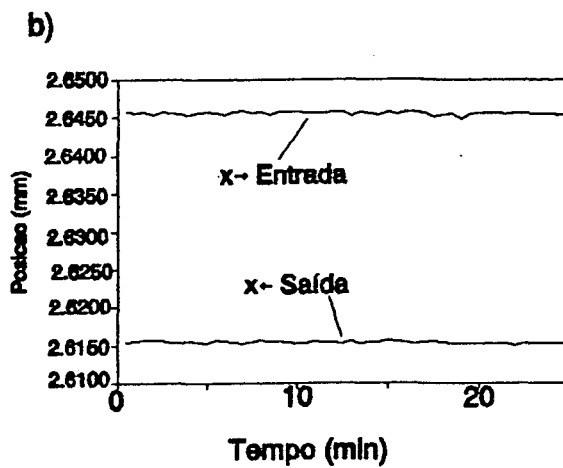
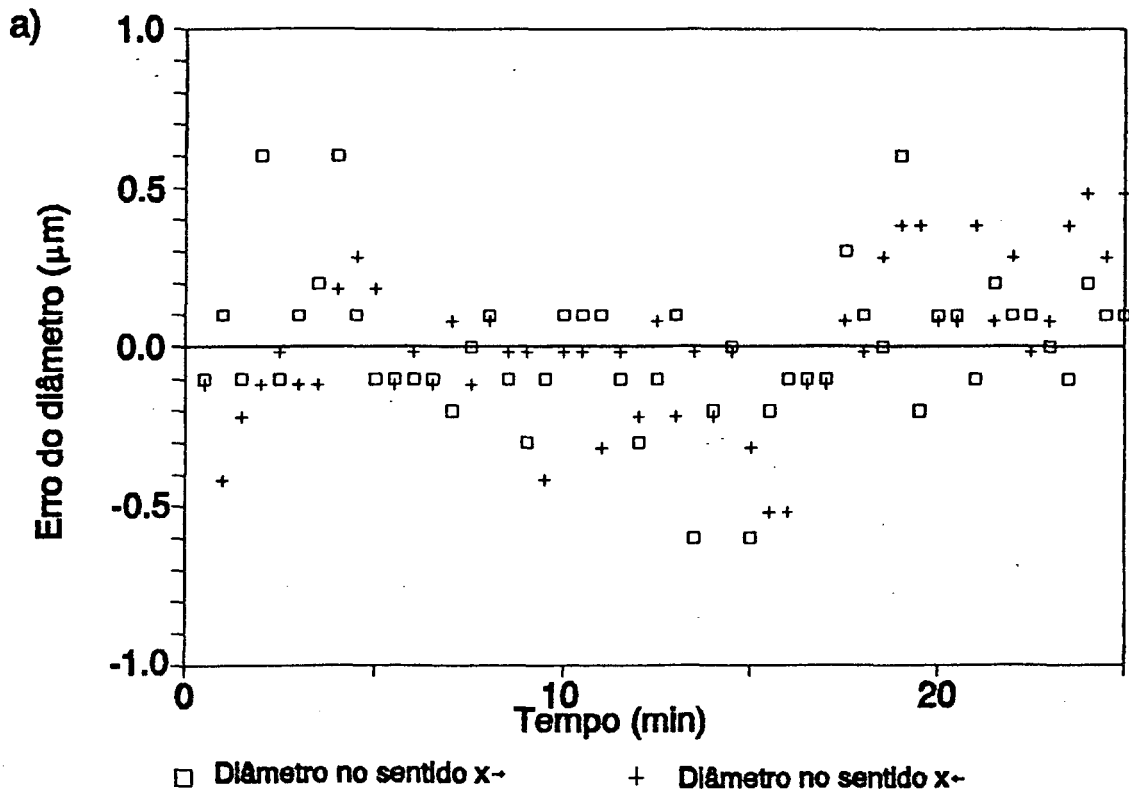


Figura 5.2 - Ensaio de repetibilidade e histerese

Como observação inicial, pode-se dizer que os valores de velocidades aqui citados não são equivalentes a velocidade de apalpação de uma máquina de medir por coordenadas, isto devido a uma limitação da própria mesa de microdeslocamentos utilizada. A velocidade de apalpação de uma CMM é tipicamente da ordem de 5mm/s para uma máquina com CNC. Para uma máquina com apalpador optoeletrônico seria interessante que esta velocidade fosse ainda maior, por exemplo 20-30mm/s, o fato de não haver contato mecânico possibilita o aumento desta velocidade.

Como quesitos para este ensaio tem-se: estabilização térmica da bancada; um arame padrão de 2.05mm de diâmetro nominal; e 20 leituras nos sentidos $x \rightarrow$ e $x \leftarrow$ para cada velocidade. As velocidades serão determinadas, via controlador da mesa de microdeslocamentos, nos seguintes valores: 1000, 2000, 5000, 10000steps/s; de posse da relação $1\text{step} = 0.06\mu\text{m}$, tem-se 0.06, 0.12, 0.3, 0.6mm/s, respectivamente.

Na figura 5.3 observa-se a resposta do sistema à variação da velocidade. Como primeira observação cabe destacar que o sistema é praticamente imune às variações de velocidade, para as velocidades já mencionadas, no que diz respeito a determinação do diâmetro (fig. 5.3.a). Para o caso das posições de sensoriamento (fig. 5.3.b-c) isto não é verdade, pois observa-se uma visível tendência à variação.

A análise feita acima pode ser extrapolada para velocidades maiores, ou seja, para medições diferenciais a velocidade não afeta significativamente os resultados. No caso da determinação de uma

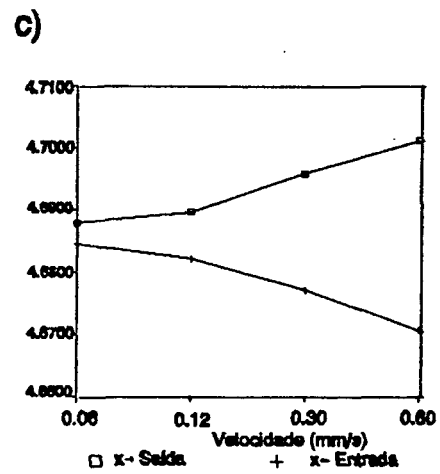
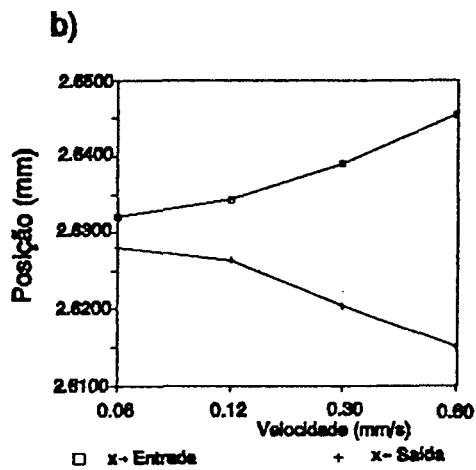
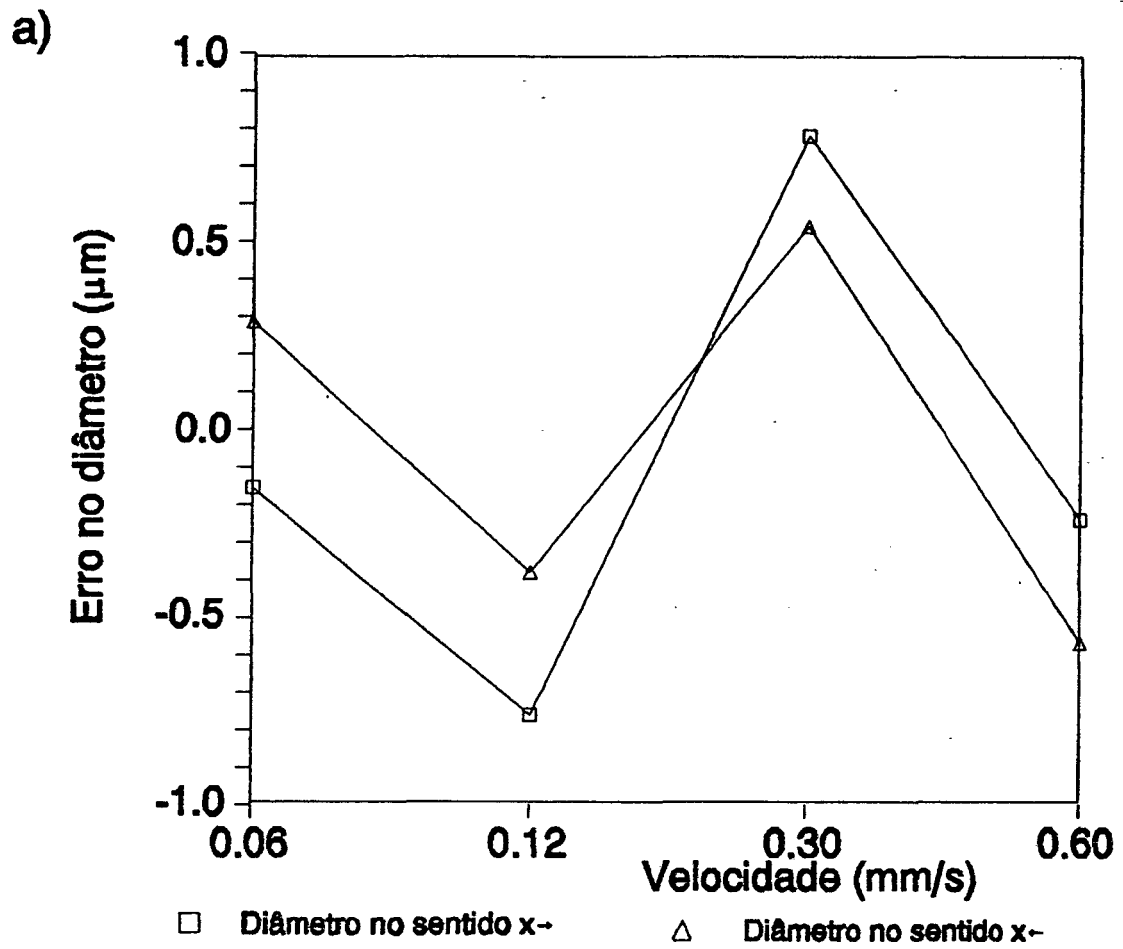


Figura 5.3 - Ensaio da dependência com a variação da velocidade

posição, mas sendo um valor sistemático dependente da velocidade pode ser compensado.

Por inferência dos dados, relativos a figura 5.3, pode-se estabelecer:

- diâmetro no sentido $x \rightarrow$:
 - valor médio = 2.056mm
 - DM(95%) = ± 0.001 mm
 - valor máximo = 2.056mm
 - valor mínimo = 2.055mm;
- diâmetro no sentido $x \leftarrow$:
 - valor médio = 2.056mm
 - DM(95%) = ± 0.001 mm
 - valor máximo = 2.056mm
 - valor mínimo = 2.055mm.

Observa-se que não existe uma tendência visível de variação da dispersão da medição com a variação da velocidade.

5.4 - ENSAIO DE SENSORIAMENTO EM DIFERENTES POSIÇÕES AO LONGO DO FEIXE

Objetiva determinar o comportamento do apalpador no vão, entre o diodo laser e o fotodetector, onde pode-se executar a apalpação sem aumentar os erros de medição.

Para realização deste ensaio respeitaram-se as seguintes condições: toda bancada estabilizada termicamente; os padrões corporificados

são arames padrão de 2.05, 6.35 e 10.00mm de diâmetro nominal, três padrões para verificar se existe ou não influência do raio de curvatura da superfície da peça ao longo do feixe; vinte leituras nos sentidos $x \rightarrow$ e $x \leftarrow$ para cada uma das cinco posições dos três padrões.

A figura 5.4 mostra a variação das leituras dos diâmetros, do arame padrão de 2.05mm. Das leituras pode-se inferir que os diâmetros médios foram: $2.058 \pm 0.001\text{mm}$ e $2.0580 \pm 0.0007\text{mm}$, para os diâmetros no sentido $x \rightarrow$ e $x \leftarrow$, respectivamente. A incerteza do resultado é dada pela dispersão da medição para noventa e cinco por cento - DM(95%).

Para o arame padrão de 6.35mm (fig. 5.5) os resultados obtidos foram: $6.360 \pm 0.001\text{mm}$ e $6.360 \pm 0.001\text{mm}$.

Finalmente, para o pino padrão de 10.00mm (fig. 5.6) os resultados obtidos foram: $10.012 \pm 0.001\text{mm}$ e $10.0120 \pm 0.0008\text{mm}$.

Como percebe-se a medição pode ser realizada, com erros em torno de $1\mu\text{m}$, em qualquer ponto dentro da faixa não existindo restrições quanto ao raio de curvatura da superfície.

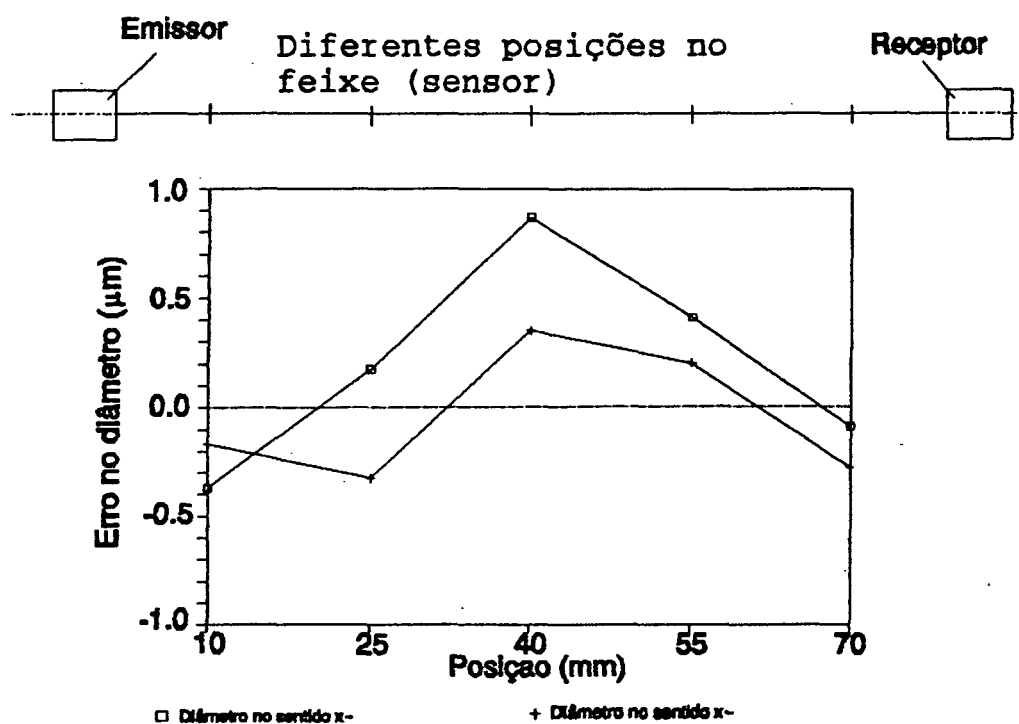


Figura 5.4 - Ensalo de sensoriamento em diferentes posições ao longo do feixe - $\phi = 2.05\text{mm}$

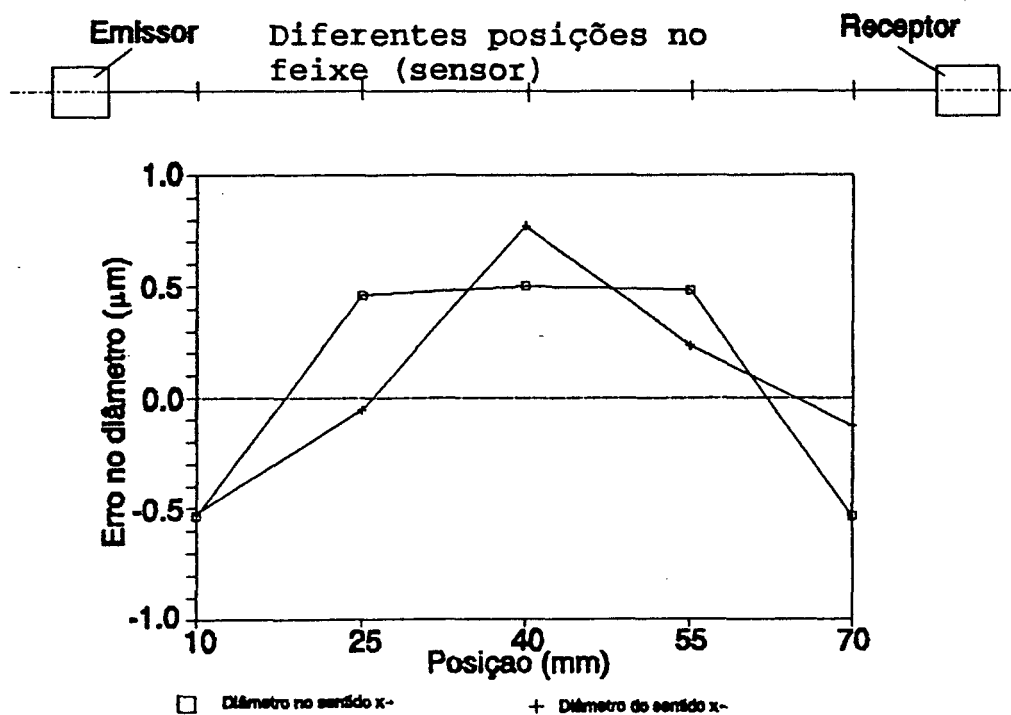


Figura 5.5 - Ensalo de sensoriamento em diferentes posições ao longo do feixe - $\phi = 6.35\text{mm}$

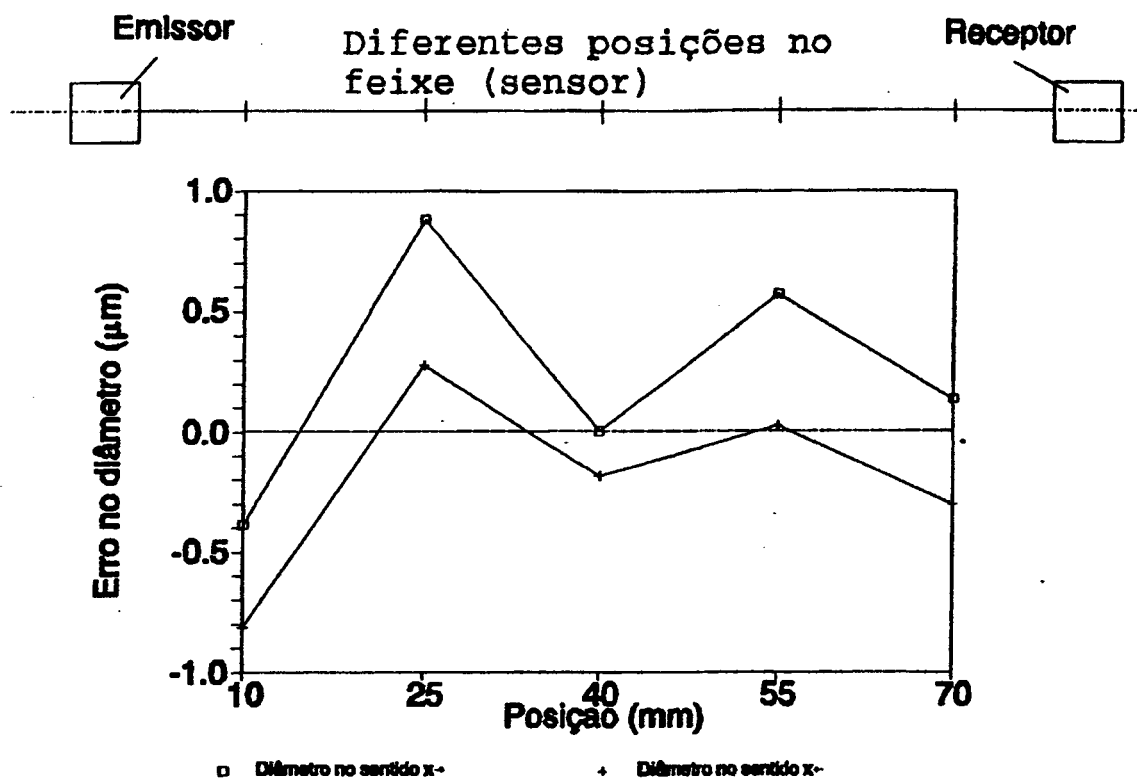


Figura 5.6 - Ensalo de sensoriamento em diferentes posições ao longo do feixe - $\phi = 10\text{mm}$

5.5 - MEDIÇÃO DE DIFERENTES DIÂMETROS

Objetiva o levantamento de uma curva de erro sistemático para o apalpador, segundo o ralo de curvatura da superfície da peça.

Como quesitos para este ensalo tem-se: toda bancada estabilizada termicamente; arames padrão de 0.39, 0.53, 1.10, 2.05, 4.00 e 6.35mm e o pino padrão de 10mm de diâmetro nominal; 20 leituras nos sentidos x \rightarrow e x \leftarrow para cada diâmetro na mesma posição ao longo do feixe.

A figura 5.7 mostra no eixo das ordenadas o erro sistemático, no eixo das abscissas aparece o diâmetro, formando assim uma função de transferência. Na figura, percebe-se um comportamento exponencial, isto devido a reflexão (Item 3.2.3) na superfície sob medição da peça. Em torno de 1.00mm observa-se uma maior dispersão dos valores, isto deve-se ao diâmetro do feixe laser ser maior que os diâmetros dos pinos padrão abaixo deste valor. Em decorrência disto, há a formação de padrões de difração e reflexão sobre o diafragma externo, provenientes de ambas as bordas da peça, ocasionando assim um pequeno acréscimo de potência luminosa incidente sobre o fotodetector e em consequência uma pequena elevação no valor médio de seus diâmetros.

Como já foi mencionado, a linha de ordenada zero pode ser deslocada ao longo de todo o eixo das ordenadas pelo simples ajuste na unidade de tratamento de sinais do apalpador. Isto é útil para a eliminação do erro sistemático, quando procede-se a medição de peças com o mesmo, ou alto raio de curvatura.

Da figura 5.7 pode-se inferir que para a faixa de operação de 0.3 a 10mm o erro sistemático relativo - devido a variação do diâmetro sob medição - é da ordem de $15\mu\text{m}$ e para uma faixa de operação de 2 a 10mm é da ordem de $4\mu\text{m}$.

5.6 - CONSIDERAÇÕES METROLÓGICAS FINAIS

Para finalizar o capítulo far-se-á uma quantificação e análise dos erros aleatórios e sistemáticos do apalpador. Para o caso do erro

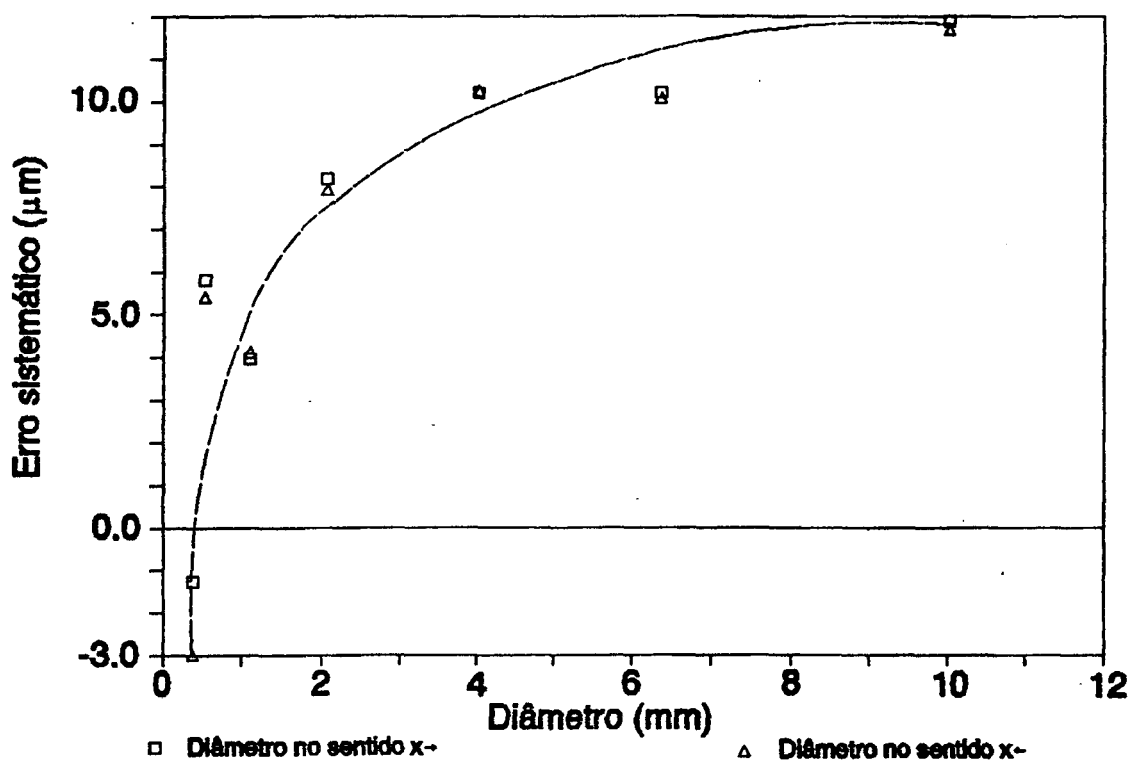


Figura 5.7 - Medição de diâmetros (arames padrão + pino padrão)

aleatório pode-se compará-lo com o calculado teoricamente no item 3.7.2.

5.6.1 - Cálculo da Dispersão da Medição do Apalpador

A dispersão da medição aqui considerada será a do ensaio de repetibilidade e histerese (item 5.2). O erro do padrão corporificado será desconsiderado, pois não há movimentação relativa entre este, o sistema de medição de posição e o apalpador, ou seja, não existe variação na grandeza a medir.

Para cálculo da dispersão da medição partir-se-á da equação 5.1

$$DM_T = \pm \sqrt{DM_E^2 + DM_A^2} \quad (5.1)$$

onde DM_T = dispersão da medição total determinado nos ensaios

DM_E = dispersão da medição da escala

DM_A = dispersão da medição do apalpador.

De posse desta equação e sabendo-se que $DM_T = \pm 0.5\mu\text{m}$, determinado no item 5.2, e que $DM_E = \pm 0.3\mu\text{m} / 52/$, chega-se a conclusão de que $DM_A \leq \pm 0.4\mu\text{m}$, ou seja a dispersão da medição do apalpador.

Como percebe-se, a dispersão da medição determinada nos ensaios é quatro vezes maior que a dispersão da medição calculada teoricamente ($\pm 0.1\mu\text{m}$). Este valor seria impossível de ser comprovado com a atual bancada de ensaios, já que a dispersão da medição da escala é $\pm 0.3\mu\text{m}$. Para ter-se condições de determinar experimentalmente o valor da dispersão da medição do apalpador, seria necessário fazer uso de uma escala com erro máximo de $\pm 0.01\mu\text{m}$. Portanto, conclui-se que a escala não é própria como padrão.

5.6.2 - Cálculo do Erro Sistemático do Apalpador

Numa simplificação para o cálculo do erro sistemático, serão feitas as seguintes considerações: erro desprezível devido a variação da velocidade - já que, por exemplo em máquinas de medir por coordenadas com CNC, a velocidade varia insignificamente durante as medições; mesma posição de sensoriamento ao longo do feixe - já

que, por exemplo, na medição de chapas somente o eixo ortogonal a mesma, da máquina, movimentar-se-á e portanto o "contato" será sempre na mesma posição do feixe.

Diante destas considerações e inferindo os dados da figura 5.7 pode-se chegar as seguintes conclusões, quanto ao erro sistemático (E_s):

- para diâmetros de 0.39 a 10.00mm $\Rightarrow E_s = 15\mu\text{m}$;
- para diâmetros de 2.05 a 10.00mm $\Rightarrow E_s = 4\mu\text{m}$;
- extrapolando-se os valores, pode-se concluir que para diâmetros acima de 10mm a variação do erro sistemático é praticamente desprezível.

Ou seja, para o pior caso, o erro sistemático do apalpador é de $15\mu\text{m}$. Dependendo da aplicação pretendida para o sistema, estes erros podem ser desprezados e para o caso onde requeira-se uma medição mais criteriosa, basta dispor das curvas de calibração em tabelas, ou já programadas em um *software*, para promover compensação.

Como observação final cabe destacar que o apalpador deve determinar fronteiras de peças, pura e simplesmente. Neste caso, deveriam ser considerados também os erros de histerese ou aqueles dependentes da velocidade no cálculo do resultado da medição. Mas como normalmente realiza-se medições diferenciais, esse erro contribui igualmente para as coordenadas, sendo automaticamente compensado.

5.7 - OUTRAS CARACTERÍSTICAS

Quanto ao objeto sob medição percebe-se, pelos diversos ensaios acima explanados, que o apalpador foi testado para medição de diâmetros. A medição de peças com geometrias mais complexas deve ser executada em máquinas de medir por coordenadas, pela necessidade da movimentação para varredura da peça pelo apalpador. Por exemplo realizou-se a medição do passo de uma rosca com uma dispersão da medição (95%) na ordem de $\pm 3\mu\text{m}$ em uma CMM com $I_m = \pm 4\mu\text{m}$.

Quanto as características operacionais, pode-se dizer que existe a necessidade de proceder a um bom (depende da incerteza de medição que se deseja alcançar) alinhamento da peça em relação aos eixos coordenados da máquina. Também há a necessidade de uma boa limpeza da peça a medir, para evitar a influência de sujeira na superfície da peça, no resultado de medição. Após isto realizado, a medição torna-se bastante fácil e rápida, quando comparada com os apalpadores mecânicos.

Quanto as características físicas, existe uma parte do apalpador que permanece vinculado ao braço de medição da CMM, esta parte tem um peso aproximado de 100g. A eletrônica fica fisicamente separada desta e ligada eletricamente via cabo flexível. Com relação ao tempo de resposta do protótipo (bastante rápido, tempo de resposta na ordem de $5\mu\text{s}$) atendendo as especificações para este requisito (item 3.1).

6 - CONCLUSÕES

Apresentou-se os resultados do desenvolvimento de um apalpador optoeletrônico para máquina de medir por coordenadas. O desenvolvimento culminou com a montagem de um protótipo a nível laboratorial, que demonstrou as potencialidades do princípio.

O domínio de teoria dos diodos lasers, fotodetetores e componentes eletrônicos em geral (optoeletrônica), bem como de suas aplicações, foi necessário para a implementação, desenvolvimento e construção do protótipo. Fez-se o detalhamento de suas principais características, potencialidades e aplicações.

O princípio de funcionamento é a apalpação por interrupção de feixe laser. Um diodo laser e um fotodetector, acoplados a um arco, gera e recebe um feixe (sensor), que quando obstruído/desobstruído desencadeia um processo eletrônico que dispara a rotina de leitura das coordenadas na máquina de medir por coordenadas. Com a interposição de uma peça entre estes dois componentes e com a movimentação relativa entre eles e a peça, procede-se um *scanning* do perfil desta peça e a posterior aquisição de suas coordenadas.

O apalpador optoeletrônico proposto presta-se para a medição de quaisquer peças que possam ser medidas a partir da projeção de seu

perfil. Por exemplo: pinos, chapas, roscas, etc. Extrapolando a função de apalpador, este poderia ser utilizado em máquinas de comando numérico, ou qualquer outra máquina onde seja necessário um controle do posicionamento, ou um posicionamento sem contato mecânico.

Característica geral dos sistemas baseados na optoeletrônica, o apalpador efetua medições sem contato mecânico, o que é uma grande vantagem sobre os demais apalpadores. Além disto, o apalpador optoeletrônico pode ser facilmente adaptado as diversas máquinas de medir por coordenadas do mercado, é compacto, de fácil utilização, apresenta baixos erros e seus componentes são de baixo custo e facilmente encontrados no mercado.

Montou-se também uma bancada, simulando uma máquina de medir por coordenadas, para ensaios do apalpador. Como características desta bancada pode-se citar: automação da aquisição de dados, movimentação automática na direção mais requisitada, *software* para processamento e apresentação das leituras/resultados e dispositivos para alinhamento do sistema.

Como resultados apresenta-se uma dispersão da medição determinada teoricamente na ordem de $\pm 0.1\mu\text{m}$ e via ensaios, $\pm 0.4\mu\text{m}$. A diferença provém da bancada de ensaios que, apesar de utilizar os melhores recursos disponíveis, mostrou-se insuficiente como padrão para testar o apalpador. Com relação aos erros sistemáticos fez-se um levantamento prévio, segundo os padrões disponíveis, que determinou valores máximos na ordem de $15\mu\text{m}$, na medição de pequenos diâmetros

($\varnothing \leq 10\text{mm}$). Para valores acima de 10mm a variação do erro sistemático tende a valores desprezíveis.

O protótipo encontra-se a nível laboratorial, portanto, para utilização industrial, deve-se realizar a engenharia de produto, explorando suas inúmeras potencialidades para diversas aplicações.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /01/ Soares, O.D.D.
Gomes, A.O.S. Laser Dimensional Metrology. Proceedings of the NATO, Advanced Study Institute - Viana de Castelo, 07/1984.
- /02/ Dias, J. S. Desenvolvimento de uma unidade de tratamento do sinal de fotodetetores de posição contínuos. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), UFSC, 12/1990.
- /03/ Cornillaut, J. Applications métrologiques des lasers: Les mesures de profil de surface et dimension d'objet par laser. Mécanique Matériaux Électricité, n. 430, 05/1989.
- /04/ Groover, M.P. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. Prentice-Hall, ISBN 0-13-054632-6.025, 1987.
- /05/ OLSEN Micro Laser. Olsen Tecnologia, 198?.

- /06/ Kelly, B.O. Techniques for using the position
Nemhauser, R.I. sensitivity of silicon photodetectors to
provide remote machine control. 21st
Annual IEEE Machine Tool Conference,
10/1973.
- /07/ NATIONAL Optical sensors for position and
ENGINEERING displacement measurement.
LABORATORY
- /08/ CARL ZEISS LTP60 - Laser-Triangulationstaster.
Produktinformation.
- /09/ CARL ZEISS JENA KKR Optoelectronic Measuring System.
Applikation information, Instruments for
Engineering Metrology, 09/1987.
- /10/ Creath, K. Interferometric investigation of a diode
laser source. Applied Optics, v.24, n. 9,
05/1985.
- /11/ Ning, Y. Characteristics of laser diodes for
Grattan, T.V. Interferometric use. Applied Optics, v.
Meggitt, B.T. 28, n. 7, 09/1989.
Palmer, A.W.
- /12/ Wolinski, W. Laser Measurement 1968-1987 and beyond.
Rozprawy Elektrotechniczne, 34, z. 4,
1988.
- /13/ Chen, J. Heterodyne interferometric with a
Ishii, Y. frequency-modulated laser diode. Applied
Murata, K. Optics, v. 27, n. 1, 01/1988.

- /14/ Kikuta, H. Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light. Applied Optics, v. 25, n. 17, 09/1986.
Iwata, K.
Nagata, R.
- /15/ Dobosz, M. Optical profilometer: a practical approximated method of analysis. Applied Optics, v. 22, n. 24, 12/1983.
- /16/ Bien, F. Absolute distance measurements by variable wavelength interferometry. Applied Optics, Camac, M. v. 20, n. 3, 02/1981.
Caulfield, H.J.
Ezekiel, S.
- /17/ Zhiikin, A.M. Noncontact optoelectronic position transducers. Sov. J. Opt. Technol., 45(6), Vasil'ev, V.D. 06/1978.
- /18/ Kohno, T. High precision optical surface sensor. Ozawa, N. Applied Optics, v. 27, n. 1, 01/1988.
Miyamoto, K.
Musha, T.
- /19/ Lou, D.Y. Surface profile measurement with a dual-beam optical system. Applied Optics, v. Martinez, A. 23, n. 5, 03/1984.
Stanton, D.
- /20/ Schneider, C.A. Máquinas de Medir por Coordenadas. Schoeler, N. Apostila CERTI/LABMETRO, 12/1988.
Veiga, C.L.N.
- /21/ Loebnitz, D. Untersuchungen zur Form- und Lageprüfung mit Hilfe von Mehrkoordinatenmessgeräten. Tese de doutorado. 02/1980.

- /22/ Kochsiek, V.M. Entwicklung und Untersuchung eines
Kunzmann, H. induktiven Drei-Koordinaten-Wegaufnehmers.
Lüdicke, F. Feinwerktechnik & Messtechnik, 83, Heft 5,
1975.
- /23/ Neumann, H.J. CNC-Koordinatenmesstechnik. Expert Verlag.
: ISBN 3-8169-0220-0. 1988.
- /24/ Ahlers, R.J. Opto-elektronische Koordinatenmeßgeräte
Rauh, W. und ihre Einbindung in
Qualitätssicherungssysteme. VDI BERICHTE
NR. 836, ISBN 3-18-090836-x, 1990.
- /25/ Loewen, E.G. High Speed Optical Scanning Techniques for
Dimensional Measurement. Annals of the
CIRP, v. 29, 02/1980.
- /26/ Brigel, J.H. P r ä z i s i o n s - M e s s t a s t e r u n d
Brigel, A.G. M a s c h i n e n m e s s v o r r i c h t u n g e n f ü r
Stäfa z e i t s p a r e n d e u n d a u t o m a t i s c h e K o n t r o l l e .
Schweiz M i c r o t e c n i c 3 , 1 9 8 6 .
- /27/ Koch, K.P. Koordinatenmessung mit einem Laser-
Peter, R. Triangulationstaster. Feinwerktechnik &
Welsig, S. Messtechnik 96, 1988.
- /28/ Slavik, J. Optische Rauheitsmessung. Feinwerktechnik
Höfler, H. & Messtechnik 96, 1988.
- /29/ Androsson, H. Microtecnic 86. Internationale Fachmesse
für Präzisionstechnik und dimensionelles
Messen und Prüfen. Qz 32, 1986.

- /30/ Bodschiwinna, H. Einsatzmöglichkeiten optischer Verfahren zur Rauheitsmessung in der industriellen Fertigung. VDI BERICHTE NR. 659, ISBN 3-18-090659-6, 1987.
- /31/ Hecht, J. Diode-laser performance rises as structures shrink. Laser Focus World, 05/1992.
- /32/ Plant, T.K. Critical testing ensures quality diode-laser performance. Laser Focus World, 02/1992.
- /33/ Matsui, S.
Takiguchi, H.
Taneya, M.
Yamamoto, O.
Hayashi, H.
Yamamoto, S.
Yano, s.
Hijikata, T. Low noise characteristics of V-channeled substrate inner stripe laser in single-longitudinal-mode operation. Applied Optics, v. 23, n. 22, 11/1984.
- /34/ Hertsens, T. Measuring diode laser characteristics. Laser & Optronics, 02/1989.
- /35/ Kajimura, T.
Kuroda, T.
Yamashita, S.
Nakamura, M.
Umeda, J. Transverse mode stabilized $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ visible diode lasers. Applied Optics, v. 18, n. 11, 06/1979.

- /36/ Wilson, J.
Hankes, L.F.B. Optoelectronics, an introduction. Prentice Hall International (UK) Ltd, 2nd. Ed., ISBN 0-13-638461-7, 1989.
- /37/ Arimoto, A.
Ojima, M. Diode laser noise at control frequencies in optical videodisc players. Applied Optics, v. 23, n. 17, 09/1984.
- /38/ Light, W. Non-contact optical position sensing using silicon photodetectors. United Detector Technology, 04/1982.
- /39/ UNITED DETECTOR
TECHNOLOGY INC. Planar Diffused Silicon PIN Photodiodes. Planar diffused photodiode series D-022-0277.
- /40/ UNITED DETECTOR
TECHNOLOGY Optoelectronic Components Catalog. UDT Sensors, Inc., Hawthorn, CA.
- /41/ EG&G ELECTRO-
OPTICS Silicon "Photovoltaic" Detectors and Detector/Amplifier Combinations. Application Note D3011C-6, 05/1982.
- /42/ EG&G ELECTRO-
OPTICS Photoconductive Silicon Photodiode Application Notes. Application Note D3000D-2, 01/1985.
- /43/ MITUTOYO PH9 Motorized prob head. Catálogo do fabricante.
- /44/ Guimarães, M. F. Um sistema de medição de pequenos diâmetros de fios metálicos para aplicação Industrial. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica) UFSC, 12/1992.

- /45/ Langlois, P.
Lessard, R.A.
Boivin, A. Real time curvature radii measurements using diffraction edge waves. Applied Optics, v. 24, n. 8, 04/1985.
- /46/ MELLES GRIOT Optics Guide 5. ISSN 1051-4384 1976115M 1290, 1990.
- /47/ SHARP LT022MC/LT022MD/LT022MF. Catálogo do fabricante, 1987.
- /48/ Naumann, H.
Schoröder, G. Bauelemente de Optik, Taschenbuch der technischen Optik. Carl Hanser Verlag München Wien, ISBN 3-446-14960-0, München, Germany, 1987.
- /49/ ANALOG DEVICES Linear Products Databook. Norwood: Analog Devices, Inc., 1990.
- /50/ TEXAS
INSTRUMENTS Linear Circuits, Databook. Texas Instruments. Dallas, Texas, 1989.
- /51/ CARL ZEISS JENA Alambre Calibrados para Medir Roscas. V 220 Ag 29 149 80. Catálogo do fabricante.
- /52/ LABMETRO Certificado de calibração - SM Deslocamento JH / MT 30. Laboratório de Metrologia e Automatização, UFSC, n. 692, 10/1992.
- /53/ DR. JOHANNES
HEIDENHAIN Digitaler Meßtaster. METRO 3010, METRO 1010. 03/1977.
- /54/ Schneider, C.A.
Lücke, H.A. Técnicas de pesquisa experimental. Apostila CERTI/LABMETRO, 1990.

- /55/ Soares, J.S.I. Contribuição ao projeto de apalpadores para medir comprimentos com suspensão em guias de molas paralelas laminadas. Dissertação (mestrado em engenharia mecânica), UFSC, 09/1979.
- /56/ Wieman, C.E. Using diode lasers for atomic physics. Rev. Sci. Instrum., 62(1), 01/1991.
Hollberg, L.
- /57/ Pawliszyn, J. LEDs and laser diodes in schlieren optics methods. Rev. Sci. Instrum., 58(2), 02/1987.
- /58/ Katz, J. Electronic beam steering of semiconductor injection lasers: a theoretical analysis. Applied Optics, v. 22, n. 2, 01/1983.
- /59/ Rozzi, T.E. Spatial and temporal instabilities in multistripe semiconductor lasers. Journal Optical Society of America, v. 2, n. 1, 01/1985.
Shore, K.A.
- /60/ Tatsuno, K. Measurement and analysis of diode laser wave fronts. Applied Optics, v. 20, n. 20, 10/1981.
Arimoto, A.
- /61/ Haney, M. Measurement of the temporal coherence properties of pulsed single-mode laser diodes. Applied Optics, v. 24, n. 13, 07/1985.
Psaltis, D.
- /62/ Schneider, C.A. Sistemas de medição. Apostila CERTI/LABMETRO, 1990.

- /63/ Stout, D.F. Handbook of Operational Amplifier Circuit Design. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, ISBN 0-07-061797-X, 1976.
- /64/ TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED The TTL Data Book for Design Engineers, 2nd ed., 1981.
- /65/ Hecht, E. Zajac, A. Optics. Addison-Wesley Publishing Company, New York, 09/1973.
- /66/ NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION LS/S/TTL Logic, Databook. National Semiconductor Corporation, Santa Clara, California, 1987.
- /67/ NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION General Purpose Linear Devices, Databook. National Semiconductor Corporation, Santa Clara, California, 1989.
- /68/ PHYSIK INSTRUMENTE Das PI System-Information MS26E, C-804, C-812, DC-Motor Controller - How it works and how to use it, Germany, 01/1991.
- /69/ DR. JOHANNES HEIDENHAIN Betriebsanleitung, Mode d'emploi, Operating Instructions - VRZ 100. Dr. Johannes Heidenhain, West Germany, 01/1980.
- /70/ TI CONVENTRY GAUGE LTD. Coventry Gauge. Statements of Calibration. Gauge Blocks. Catálogo do fabricante, 1980.